

Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых
и пищевых производств»

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплинам «Теплотехника»,
«Техническая термодинамика и теплотехника»
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,
18.03.01 «Химическая технология»
21.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной, заочной, очно-заочной форм обучения

Энгельс 2024 г.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное изучение термодинамических основ работы парокомпрессионной холодильной машины (ПКХМ). Ознакомление с конструктивной схемой, принципом действия и методикой теплового расчёта ПКХМ, экспериментальное определение параметров хладагента в характерных точках с построением рабочего цикла установки в $\lg P$ - h -диаграмме. Оценка теоретических и действительных показателей эффективности испытанной ПКХМ.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Основным назначением холодильных машин является выработка искусственного холода, то есть отвод теплоты от охлаждаемого объекта в окружающую среду, имеющую более высокую температуру.

Согласно второму закону термодинамики, тепло, отводимое от тела с более низкой температурой, не может само переходить к окружающей среде, имеющей более высокую температуру. Поэтому производство холода в холодильных машинах любых типов всегда сопровождается затратами энергии. Рабочее тело холодильных машин называется хладагентом.

По виду хладагента холодильные машины бывают газовые и паровые.

В газовых холодильных машинах холод получается в процессе расширения газа высокого давления с начальной температурой окружающей среды и конечной температурой ниже окружающей среды. Расширение газа проводят в специальных расширительных машинах – детандерах, чтобы получить максимальный эффект охлаждения.

В паровых холодильных машинах холод получается за счёт дросселирования насыщенной жидкости хладагента (т.е. жидкости, имеющей температуру кипения при данном давлении) с высоким давлением и температурой, равной температуре окружающей среды. В процессе дросселирования давление жидкости понижается. Этому пониженному давлению соответствует меньшее значение температуры кипения и, следовательно, в процессе дросселирования жидкость становится перегретой и часть её мгновенно испаряется (получается насыщенная парожидкостная смесь при давлении, близком к атмосферному). На фазовый переход в системе расходуется значительное количество энергии, и в результате система охлаждается ниже температуры окружающей среды.

Наиболее распространенными и достигшими в конструктивном отношении высокой степени совершенства и экономичности являются паровые компрессионные холодильные машины. Принципиальная схема ПКХМ показана на рис. 1.

Компрессор служит для сжатия паров холодильного агента, отсасываемого из испарителя и сепаратора (отделителя жидкости). Сжатие паров сопровождается их перегревом. В ПКХМ используются объёмные компрессоры, как правило, поршневые одно- и двухступенчатого сжатия.

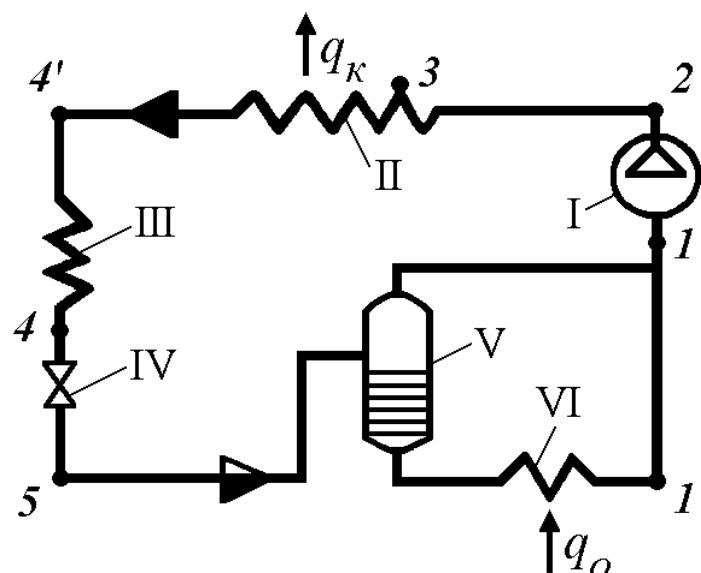


Рис.1. Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной установки.
 Обозначения: I – компрессор; II – конденсатор; III – переохладитель конденсата; IV – дроссельный вентиль; V – сепаратор; VI – испаритель; 1', 1, 2, 3, 4', 4, 5 – граничные точки характерных термодинамических процессов цикла ПКХМ, показанного на рис.2

В конденсаторе осуществляется конденсация сжатых паров холодильного агента с образованием конденсата – насыщенной жидкости хладагента, процесс сопровождается отводом теплоты к окружающей среде. В холодильных установках конденсация происходит при охлаждении паров хладагента до температуры окружающей среды воздухом (в малых холодильных машинах) или водой (в средних и крупных холодильных машинах). Воздушный конденсатор представляет собой трубную панель или змеевик снаружи обтекаемый свободным (естественная конвекция) или направленным (вынужденная конвекция) потоком воздуха. Водяной конденсатор обычно представляет собой кожухотрубчатый теплообменный аппарат, где внутри труб движется охлаждающая вода, а в межтрубном пространстве конденсируются пары хладагента.

В дроссельном вентиле происходит регулируемый процесс дросселирования насыщенной жидкости хладагента. Чем больше падение давления на дроссельном вентиле, тем ниже температура хладагента.

Сепаратор служит для разделения парожидкостной смеси после дросселирования. Эту функцию могут выполнять различные аппараты – отделители жидкости, ресиверы.

Испаритель служит для испарения насыщенной жидкости холодильного агента при низкой температуре. При этом теплота отводится от охлаждаемой среды к хладагенту. Конструктивно испаритель представляет собой поверхность теплообмена, трубчатую или иную, расположенную внутри охлаждаемого объекта (технологического помещения, камеры или аппарата).

В ПКХМ в качестве хладагентов используются жидкости с низкими температурами кипения (при давлениях, близких к атмосферному): аммиак, фреоны, углекислота, сернистый ангидрид и ряд других агентов.

Наиболее распространённым хладагентом в крупных и средних промышленных ПКХМ является аммиак NH_3 , поскольку он обладает наилучшим сочетанием термодинамических, теплофизических и других свойств как хладагент. Однако пары аммиака взрывоопасны и ядовиты. Поэтому промышленные аммиачные холодильные установки требуют специальных мер безопасности.

В малых холодильных машинах бытового и торгового назначения используются фреоны (хладоны – Refrigerant). Фреоны это большая группа веществ, полученных из предельных углеводородов путём замещения атомов водорода атомами брома, фтора и хлора. С этим связана и их маркировка. Наибольшее распространение в холодильной технике получили фреоны R-12, R-22 и др. Основным достоинством фреонов, применяемых в холодильной технике, является взрывопожаробезопасность и неядовитость в отличие от аммиака, а также широкая вариабельность термодинамических и теплофизических свойств этой группы веществ. Следует знать, что ряд фреоновых хладагентов негативно влияет на стратосферный озоновый слой земли. Поэтому в соответствии с Монреальским международным протоколом 1986 г. разрешенными (озонобезопасными) фреонами являются R-123, R-134a, которые и рекомендуются для применения в холодильной технике.

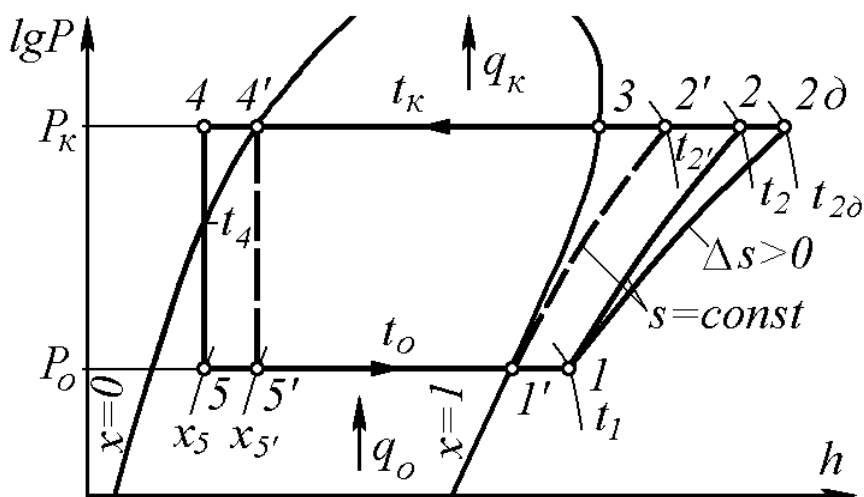


Рис.2. Цикл одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины в lgP - h - диаграмме хладагента

Циклические процессы, происходящие с хладагентами в холодильных машинах, изображают в диаграммах состояния этих веществ (паровых диаграммах). Наиболее применяемой для анализа работы и расчётов холодильных машин является энтальпийная lg - h -диаграмма, поскольку теплота изобарного процесса изменения состояния хладагента изображается в ней длиной соответствующего отрезка Δh , легко определяемого по энтальпийной шкале.

На рис. 2 схематично показаны теоретический и действительный циклы одноступенчатой ПКХМ, построенные в lgP - h -диаграмме хладагента.

За теоретическим цикл современной ПКХМ принят цикл 1-2-3-4-5:

1-2 – обратимый процесс адиабатного сжатия ($s=const$) в идеальном компрессоре слегка перегретых (непосредственно в системе испарителя или в специальном аппарате) паров хладагента от давления испарения $P_0=P_1$ и температуры t_1 , до давления конденсации $P_k = P_2$ с их перегревом до температуры t_2 ;

2-3 – изобарное охлаждение в конденсаторе перегретых паров хладагента до состояния сухого насыщенного пара с отводом теплоты q_k в окружающую среду;

3-4' – полная конденсация паров хладагента с образованием насыщенной жидкости с отводом теплоты q_k в окружающую среду;

4' -4 – переохлаждение конденсата до температуры t_4 . Переохлаждение жидкого хладагента осуществляется непосредственно в конденсаторе или специальном аппарате;

4-5 – изохнтальный процесс дросселирования хладагента на регулируемом дроссельном устройстве (например, вентиле) с падением давления до P_0 и температуры до t_0 с получением влажного насыщенного пара со степенью сухости x_5 ;

5-1' – изобарное испарение жидкого холодильного агента в испарителе до состояния сухого насыщенного пара за счет отвода теплоты q_0 от охлаждаемой среды;

1' -1 – небольшой перегрев паров хладагента перед компрессором.

Простейший цикл ПКХМ (процессы 1'-2'-3-4'-5') не включает процессов переохлаждения конденсата перед дросселированием и перегрева паров хладагента перед компрессированием. Переохлаждение конденсата перед дросселированием является действенным приёмом увеличения холодопроизводительности машины и повышения её термодинамической эффективности, что подтверждается графическим анализом цикла ПКХМ в $T-s$ - и $\lg P-h$ -диаграммах.

Действительный цикл ПКХМ (процессы 1-2 δ -3-4-5) отличается от теоретического необратимым процессом ($\Delta s > 0$) политропного сжатия паров хладагента 1-2 δ в реальном компрессоре. Это приводит к дополнительным затратам работы на привод холодильного компрессора, которые учитываются внутренним относительным КПД компрессора.

$$\eta_{0i} = \frac{l_m}{l_\delta} = \frac{N_m}{N_\delta}, \quad (1)$$

где l_m , N_m – теоретические удельная работа и мощность компрессора;

l_δ , N_δ – действительные удельная работа и мощность компрессора.

Поскольку характеристики холодильной машины подлежат изменению при эксплуатации холодильные компрессоры и агрегаты принято характеризовать холодопроизводительностью $Q_{0\text{ см}}$ и потребляемой мощностью $N_{\text{см}}$ при стандартных условиях эксплуатации.

Для пересчета холодопроизводительности Q_0 , Вт, на рабочие условия

эксплуатации (при рабочих значениях t_k и t_0) используют соотношение:

$$\frac{Q_0}{Q_{0cm}} = \frac{h_{1'} - h_{4'}}{h_{1'cm} - h_{4'cm}} \rightarrow Q_0 = \frac{Q_{0cm}(h_{1'} - h_{4'})}{C}, \quad (2)$$

где C - константа для теоретического цикла ПКХМ с хладагентом R-22 (без учёта перегрева пара в испарителе и переохлаждения жидкости в конденсаторе), равная $C = h_{1'cm} - h_{4'cm}$. Здесь и далее значения энтальпий в соответствующих точках цикла ПКХМ определяют по lgP - h -диаграмме.

Далее приводится методика поверочного расчёта холодильной машины с теоретическим и действительным циклом работы, целью которого является определение характеристик работы машины на заданном режиме эксплуатации:

- удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг:

$$q_0 = h_{1'} - h_5; \quad (3)$$

- массовый расход хладагента (массовая производительность компрессора), кг/с:

$$M = Q_0 / q_0; \quad (4)$$

- удельная, $q_{n,n}$, кДж/кг, и полная, $Q_{n,n}$, кВт, теплота на перегрев пара хладагента в испарителе:

$$q_{n,n} = h_1 - h_{1'}; \quad Q_{n,n} = M \times q_{n,n}; \quad (5 \text{ а,б})$$

- удельная работа, затрачиваемая на сжатие пара хладагента в компрессоре, теоретическая и действительная:

$$l_m = h_1 - h_2; \quad l_\partial = h_1 - h_{2\partial}; \quad (6 \text{ а,б})$$

- мощность, N , затрачиваемая на привод компрессора, теоретическая и действительная, кВт:

$$N_m = M \times l_m, \quad N_\partial = M \times l_\partial; \quad (7 \text{ а,б})$$

- удельная теплота, отводимая от хладагента в конденсаторе, теоретическая и действительная, кДж/кг:

$$q_m = h_2 - h_4; \quad q_\partial = h_{2\partial} - h_4; \quad (8 \text{ а,б})$$

- полная теплота, отводимая от хладагента в конденсаторе (тепловая нагрузка конденсатора) теоретическая и действительная, кВт:

$$Q_m = M \times q_m; \quad Q_\partial = M \times q_\partial; \quad (9 \text{ а,б})$$

- удельная $q_{n,ж}$, кДж/кг, и полная $Q_{n,ж}$, кВт, теплота на переохлаждение жидкого хладагента в конденсаторе:

$$q_{n,ж} = h_{4'} - h_4; \quad Q_{n,ж} = M \times q_{n,ж}; \quad (10 \text{ а,б})$$

- холодильный коэффициент теоретического и действительного цикла:

$$\varepsilon_m = q_0 / l_m, \quad \varepsilon_\partial = q_0 / l_\partial \quad (11 \text{ а,б})$$

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Описание лабораторной установки

Основу лабораторного стенда, схема которого представлена на рис. 3, составляет агрегат ПХКМ, представляющий собой замкнутую герметичную систему, заполненную хладагентом фреоном R-22 в смеси с фреоновым маслом.

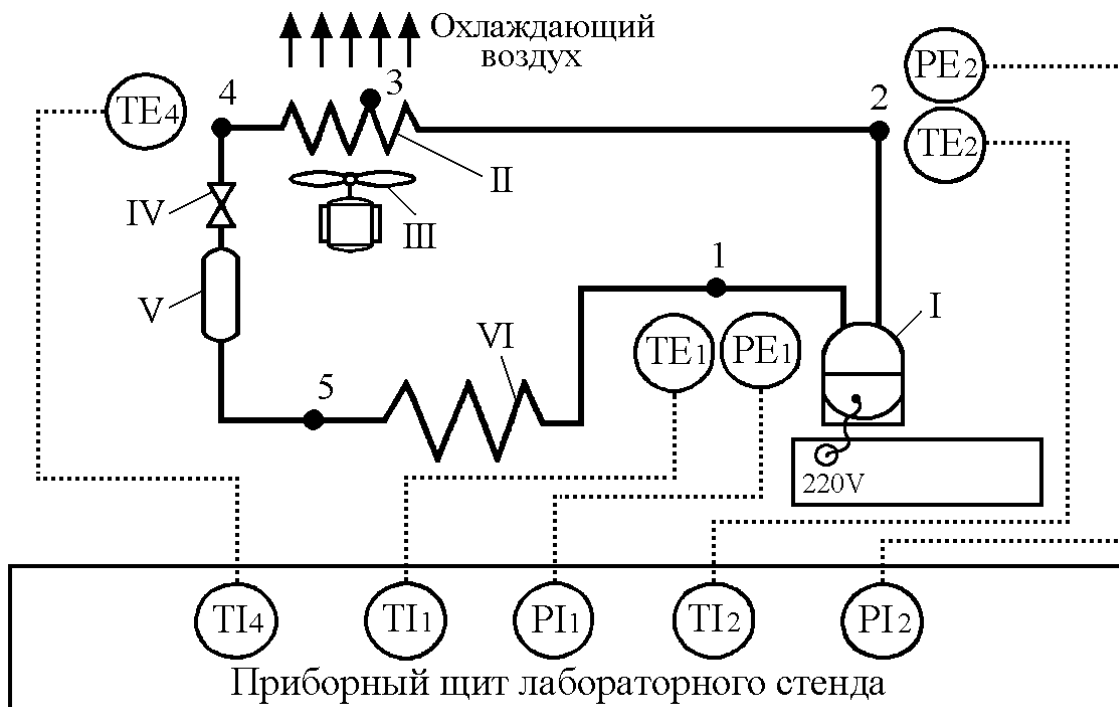


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки

Агрегат состоит из следующих основных элементов: поршневого компрессора с электродвигателем – I; конденсатора – II; вентилятора с электродвигателем – III; автоматически регулируемого дроссельного устройства – IV; ресивера – V; испарителя – VI. Блок измерительных приборов (включающий два манометра и три цифровых термометра сопротивления) смонтирован на фронтальном щите стенда.

Компрессор засасывает пары фреона, сжимает их и нагнетает в конденсатор, где происходит конденсация паров. Наружная поверхность конденсатора охлаждается воздухом при помощи осевого вентилятора. Воздух, нагреваясь, отводит теплоту в окружающую среду. Жидкий фреон после конденсатора проходит через автоматически регулируемое дроссельное устройство. Получившаяся парожидкостная смесь собирается в ресивере, который выполняет функцию сепаратора. Из ресивера жидкий фреон поступает в испаритель. Поступающий в испаритель фреон вскипает, забирая теплоту из окружающего воздуха, соприкасающегося со стенками испарителя. Пары фреона из испарителя по всасывающему трубопроводу поступают в компрессор, по-

сле чего цикл повторяется.

В лабораторной холодильной установке используется автоматическое дроссельное устройство сильфонного типа. Оно представляет собой трубку с капиллярной структурой, на которую оказывается переменное сдвливающее воздействие (посредством расширяющегося газового сосуда – сильфона, погружённого в хладагент), уменьшающее проходное сечение капилляров. Это автоматическое устройство с обратной связью: при повышении температуры по сравнению с заданной газ в сильфоне расширяется, сдвливающее воздействие усиливается, давление и температура хладагента понижаются. Лабораторная установка предусматривает как базовый выбор режимов охлаждения, так и тонкое ручное настраивание путем дополнительного органа ручного воздействия на капиллярное дроссельное устройство.

Техническая характеристика компрессора:

тип – низкотемпературный герметичный, производства Aspera, Словакия;

марка – NE 2134 E;

холодильный агент – R22;

холодопроизводительность, Вт: $t_{\text{кип}} = -25^{\circ}\text{C}$, $t_0 = 55^{\circ}\text{C}$ 441.

2.2. Техника эксперимента

Для измерения температур на приборном щите стенда предусмотрены три стационарно установленных измерительных комплекса DST-20 (Solar-energy Thermometer), состоящих из датчика (термометра сопротивления, работающего от солнечной батареи при освещенности помещения ≥ 100 люкс) и цифрового показывающего анализатора. Согласно паспортным данным диапазон показаний комплекса DST-20 от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$; диапазон измерений от -20 до $+80^{\circ}\text{C}$; чувствительность $0,1^{\circ}\text{C}$; основная приборная погрешность в пределах установленного диапазона измерений $\pm 1^{\circ}\text{C}$, основная погрешность в остальных интервалах диапазона показаний (за пределами диапазона измерений) $\pm 2^{\circ}\text{C}$; время запаздывания 10 секунд.

Датчики температуры хладагента установлены в следующих точках: t_1 – на всасывании компрессора; t_2 – на выходе из компрессора (соответствует точке 2д действительного цикла ПКХМ); t_4 – на выходе из конденсатора.

Датчики давления хладагента установлены в точках P_1 – после испарителя (перед компрессором) и P_2 – на выходе из компрессора (перед конденсатором). Цифровое обозначение всех датчиков на схеме экспериментальной установки, рис. 3, соответствует точкам цикла ПКХМ, показанного на рис. 2 (а, б).

2.3. Требования охраны труда

1. К выполнению работы допускаются студенты, прослушавшие инструктаж по технике безопасности и правилам проведения работ в учебной лаборатории теплотехники, ознакомившиеся с правилами безопасности и методикой проведения эксперимента.

2. Работа проводится только под контролем преподавателя или лаборанта.

ранта.

3. Перед включением стенда необходимо убедиться в надежности изоляции всех токоведущих элементов, исправности коммутирующих и измерительных приборов, наличии заземления.

4. Во время проведения опыта нельзя касаться металлических частей установки.

5. Не разрешается оставлять включенную установку без присмотра. Студентам запрещается производить любые действия, не предусмотренные методикой выполнения работы.

2.4. Порядок выполнения работы

1. Осмотреть установку и, согласно схеме, найти все ее основные элементы и измерительные приборы и места установки датчиков.

2. Оценить готовность установки к работе: проверить подключение стенда к электрической сети; подключение датчиков к щитовым приборам; убедиться в исправности заземления.

3. Установить переключатель регулируемого дроссельного устройства в один из базовых режимов охлаждения.

4. Включить холодильную установку с помощью включателя.

5. Путём вращения органа ручного управления дроссельным устройством осуществить тонкое регулирование перепада давления и, соответственно, температуры охлаждения, контролируя нижнее давление P_1 по манометру. Выбранный температурный режим автоматически поддерживается на протяжении всего эксперимента.

6. Через 20 минут после включения агрегата производят запись показаний термодпар t_1 , t_2 , t_4 с интервалом 5 минут. После достижения стационарного режима, о чем судят по постоянству показаний соответствующих термометров, произвести основной замер. Значения измеренных величин занести в табл. 1.

Таблица 1

Протокол результатов измерений

Номер опыта	t_1 , °C	t_2 , °C	t_4 , °C	P_1 , МПа	P_2 , МПа
1					
2					
3					
...					

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Построение цикла ПКХМ по экспериментальным данным

Исходными данными для построения являются результаты измерений температур и давлений хладагента в характерных точках фреонового контура

Параметры хладагента для всех характерных точек циклов ПКХМ занесены в табл. 2.

3.2. Тепловой расчёт цикла ПКХМ

Произвести тепловой расчёт теоретического и действительного цикла испытываемой ПКХМ по формулам (2)–(11 а, б), (1) используя техническую характеристику холодильного компрессора.

Тепловой расчёт простейшего цикла 1'-2'-3-4'-5' провести самостоятельно по аналогии с предыдущим.

Сделать вывод из сравнения основных показателей работы ПКХМ по теоретическому, действительному и простейшему циклам. Сравнить термодинамическую эффективность этих циклов между собой, а также обратным циклом Карно в тех же температурных пределах.

Холодильный коэффициент обратного цикла Карно определяют по формуле:

$$\varepsilon_K = \frac{T_0}{T_K - T_0}, \quad (12)$$

где T – абсолютная температура, К

4. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

Отчет о выполненной работе оформляется каждым студентом в тетради для лабораторных работ. Он должен содержать:

1. Название лабораторной работы, цель работы.
2. Краткий конспект теоретических сведений, включая принципиальную схему ПКХМ.
3. Схему лабораторной установки с указанием основных элементов.
4. Протокол измерений (табл. 1).
5. Термодинамические параметры фреона-22 в характерных точках простейшего, теоретического и действительного циклов ПКХМ по форме табл. 2.
6. Тепловые расчеты указанных циклов и их сравнительный анализ.
8. Выводы по полученным результатам.
9. Список использованной литературы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Термодинамические основы

1. Назовите способ получения холода в паровых и газовых холодильных машинах.
2. Опишите схему и принцип работы ПКХМ.
3. Опишите цикл работы ПКХМ в lg P-h-диаграмме. В чём различие между теоретическим и действительным циклами ПКХМ. Как определяется индикаторный КПД холодильного компрессора?
4. В чём назначение процессов переохлаждения конденсата перед дросселированием и перегрева пара хладагента перед компрессором? Как эти процессы осуществляются технически в схеме ПКХМ?
5. Определите понятие холодильного агента. Назовите наиболее широко

используемые в ПКХМ хладагенты и особенности их применения.

6. Какую роль выполняет сепаратор, какое влияние он оказывает на холодопроизводительность ПКХМ?

7. Сравните теоретический цикл ПКХМ и обратный цикл Карно. Почему холодильный коэффициент последнего всегда больше?

8. Почему и как схема холодильной машины может использоваться в качестве идеального нагревателя – теплового насоса?

Экспериментальная установка

9. Опишите схему лабораторной установки. Какие параметры и какими приборами измеряются?

10. Опишите принцип работы автоматического регулируемого дроссельного устройства, используемого в лабораторной установке.

11. Опишите принцип работы термометра сопротивления.

12. Назовите значение температуры хладагента в точке 5 и 1 (до и после испарителя) на схеме лабораторной установки.

13. Как изменить температуру хладагента, поступающего в испаритель лабораторной установки?

14. В каком состоянии хладагент поступает и выходит из испарителя лабораторной установки?

15. В каком состоянии хладагент поступает и выходит из конденсатора лабораторной установки?

16. В каком состоянии хладагент поступает и выходит из компрессора лабораторной установки?

Изучение работы парокомпрессионной холодильной машины

Методические указания

Авторы-составители: Седелкин Валентин Михайлович
Лебедева Ольга Александровна
Казанцева Ирина Леонидовна

Ответственный за выпуск Лебедева О.А.
Оригинал-макет Лебедева О.А.

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем _____ Тираж _____ Заказ № _____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.