

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

**Исследование режимов работы и оптимизация параметров
трансформаторов тепла**

Направление подготовки (специальность): 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Магистерская программа: «Энергообеспечение предприятий. Тепломассообменные процессы и установки»

Уровень высшего образования: магистратура

Нормативный срок обучения: 2 года

Форма обучения: очная

Год набора: 2024

Смоленск

Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»



Методическое обеспечение составил:


подпись

к.т.н., доцент

Галковский В.А.
ФИО

« 17 » апреля 2024 г.

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»:


подпись

В.А. Галковский
Ф.И.О.

« 02 » мая 2024 г.

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**Методические рекомендации
к лекционным занятиям по
дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров
трансформаторов тепла»**

Смоленск

Во время проведения лекционных занятий по теме **№1 «Парожидкостные компрессионные трансформаторы тепла»** (лекция №1 и 2) рассматривается классификация парожидкостных трансформаторов тепла, рабочие агенты, применяемые в одно- и многоступенчатых установках, температурные уровни использования холодильных систем. Особое внимание уделяется схемам и процессам работы в T,S ; h,S и $\ln P,h$ – диаграммах идеального и реального одноступенчатого и многоступенчатого парожидкостного трансформатора тепла (холодильной установки). Рассматриваются схемы и процессы работы установок с дополнительным охладителем, регенеративным теплообменом и каскадные системы. При изложении материала по теме следует обратить внимание студентов на достоинства и недостатки различных парожидкостных холодильных установок, определить их особенности работы и критерии применения в современной холодильной технике.

При проведении лекционного занятия по теме **№2 «Сорбционные трансформаторы тепла»** (лекция №3) дается классификация сорбционных трансформаторов тепла, область их применения и свойства рабочих агентов, используемых в абсорбционных холодильных установках. Приводятся схемы и рассматриваются принципы работы идеальной абсорбционной холодильной установки, работающей по повышающей и расщипительной схеме; схема и процессы работы в h,ξ – диаграмме реальной абсорбционной холодильной установки, работающей по повышающей схеме. Определяются способы повышения эффективности работы данных систем, проводится сравнительный анализ применения сорбционных установок в промышленном производстве.

При проведении лекционного занятия по теме **№3 «Струйные трансформаторы тепла»** и теме **№4 «Вихревые трансформаторы тепла»** (лекция №4) приводится общая характеристика и типы струйных и вихревых трансформаторов тепла. Особое внимание уделяется изучению устройства и принципов работы струйного компрессора, схеме и термодинамическим процессам работы парэжекторной холодильной установки, процессам работы вихревой трубы.

На лекционных занятиях по темам: **№5 «Одноступенчатые газовые трансформаторы тепла»** и **№6 «Многоступенчатые газовые трансформаторы тепла»** (лекции №5, 6 и 7) изучаются идеальные газовые циклы со стационарными процессами: цикл Карно и цикл Джоуля. Приводятся схемы и процессы работы в T,S и h,S – диаграммах идеального одноступенчатого и многоступенчатого газового трансформатора тепла (холодильной установки) по циклу Джоуля, реального одноступенчатого газового трансформатора тепла (холодильной установки) по циклу Джоуля, реального одноступенчатого газового трансформатора тепла с регенерацией. Особое внимание уделяется многоступенчатому сжатию в реальных компрессорах, используемых в холодильных системах. Изучается схема и процессы работы в T,S – диаграмме реального многоступенчатого газового трансформатора тепла по циклу Джоуля. При изложении материала по темам следует обратить внимание студентов на достоинства и недостатки газовых трансформаторов тепла по сравнению с паро-

жидкостными, особенности их применения и способы повышения эффективности работы, как отдельных элементов, так и всей системы в целом.

Целью лекционного занятия по теме №7 «Трансформаторы тепла, работающие по квазициклу» (лекция №8) является ознакомление студентов с достоинствами и недостатками трансформаторов тепла, работающих по разомкнутому циклу. Изучается схема и принцип работы реальной газовой холодильной установки с вакуумным квазициклом; приводятся особенности использования данных систем в промышленном производстве и показываются характерные особенности работы отдельных элементов системы.

На лекционных занятиях по теме: №8 «Криогенные установки» (лекции №8 и 9) приводится общая характеристика газожидкостных трансформаторов тепла; особенности систем ожижения, замораживания и низкотемпературного разделения; рассматриваются рабочие агенты криогенных установок, их температурные уровни применения и термодинамические показатели. Изучаются схемы и процессы работы в T,S и h,S – диаграммах криорефрижераторов с дроссельной, дроссельно-эжекторной и детандерной ступенью окончательного охлаждения и установок со ступенью предварительного охлаждения с внешним отводом тепла. Определяются способы повышения эффективности работы отдельных элементов и систем в целом, показываются области применения криогенных установок в промышленном производстве.

Примечание: теоретические материалы по темам лекционных занятий подробно изложены в рекомендованной литературе, указанной в рабочей программе дисциплины. Список экзаменационных вопросов представлен в рабочей программе дисциплины.

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**Методические рекомендации
к выполнению практических занятий
по дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров
трансформаторов тепла»**

Смоленск

ВВЕДЕНИЕ

Практические занятия по курсу «Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла» предназначены для выполнения, с применением персональной ЭВМ студентами, обучающимися по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результатом выполнения заданий являются законченные программные продукты, позволяющие проводить вычисления с различными исходными данными и анализировать полученные результаты.

По заданию №1 проводится исследование цикла работы парожидкостной компрессионной холодильной установки при различной температуре испарения и конденсации рабочего агента.

По заданию №2 проводится исследование цикла работы газовой компрессионной холодильной установки (ГКХУ) при различной температуре рабочего агента на входе в компрессор и на выходе из охладителя.

По заданию №3 проводится исследование цикла работы газовой компрессионной холодильной установки с регенеративным теплообменником (ГКХУРТ) при различной степени регенерации.

ЗАДАНИЕ №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА РАБОТЫ ПАРОЖИДКОСТНОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. Цель работы

Исследование цикла работы парожидкостной компрессионной холодильной установки (ПЖКХУ) при различной температуре испарения и конденсации рабочего агента. Выявление характера зависимости холодильного коэффициента установки от температуры испарения и конденсации рабочего агента.

2. Задание

2.1. Изучить указания к выполнению данной работы.

2.2. Разработать блок-схему и программу для расчета цикла работы ПЖКХУ.

2.3. Согласно исходным данным, просчитать:

- цикл ПЖКХУ при различной температуре испарения рабочего агента, оставляя неизменной температуру конденсации рабочего агента. По результатам расчета построить зависимость холодильного коэффициента от температуры испарения рабочего агента:

$$\varepsilon = f_1(t_{исп});$$

- цикл ПЖКХУ при различной температуре конденсации рабочего агента, оставляя неизменной температуру испарения рабочего агента. По результатам расчета построить зависимость холодильного коэффициента от температуры конденсации рабочего агента:

$$\varepsilon = f_2(t_{конд}).$$

2.4. Провести анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы.

3. Указания к выполнению работы

Принципиальная схема и цикл работы ПЖКХУ в T,S - диаграмме приведены на рис. 1. Установка работает следующим образом. Тепло от объекта охлаждения на низко потенциальном температурном уровне T_0 подводится к рабочему агенту в испарителе IV. В результате подвода теплоты рабочий агент кипит в испарителе при давлении P_0 и температуре $T_0 = T_{исп}$, и переходит в состояние сухого насыщенного пара, определяемом точкой 1.

После испарения пары рабочего агента сжимаются в компрессоре I, где их давление повышается с P_0 до P_k . Температура при этом повышается с T_0 до T_2 . Из-за взаимодействия молекул рабочего агента и наличия трения между его молекулами и рабочими поверхностями компрессора процесс сжатия в компрессоре 1-2 не совпадает с изоэнтропным (идеальным) сжатием 1-2'. Из компрессора пар поступает в конденсатор II, где в результате отвода тепла к теплоприемнику,

которым в большинстве случаев является окружающая среда, происходит охлаждение и конденсация рабочего агента. Жидкий хладагент при давлении P_k и температуре T_k поступает на расширение в детандер III.

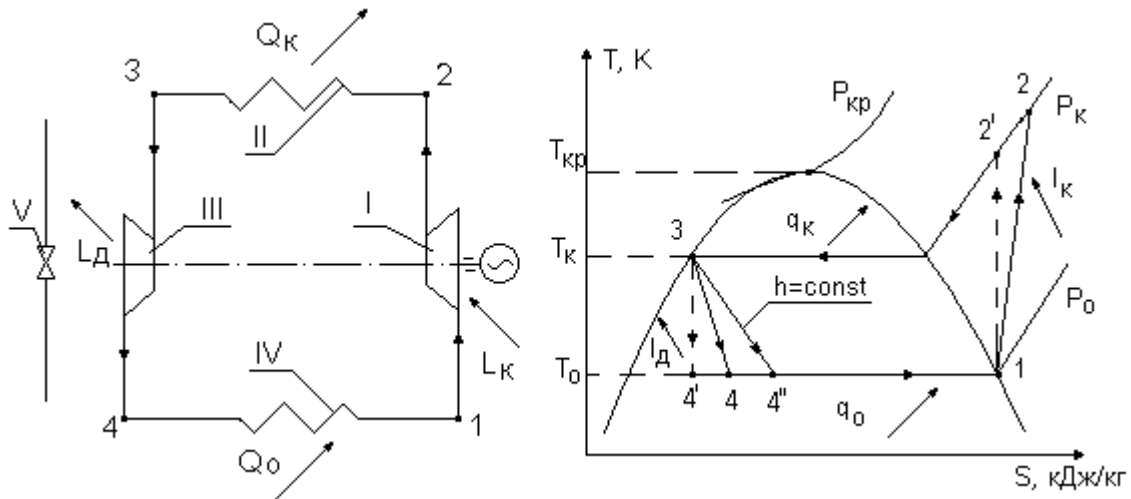


Рис. 1. Принципиальная схема ПЖКХУ и процессы работы в T,S - диаграмме
 I - компрессор; II - конденсатор; III - детандер; IV - испаритель; V - дроссельный вентиль

В результате расширения рабочего агента с совершением полезной работы его давление падает с P_k до P_0 и температура снижается. Из-за наличия необратимых потерь процесс расширения в детандере 3 - 4 не совпадает с изоэнтропным (идеальным) расширением 3 - 4'. Расширение рабочего агента с давления P_k до P_0 может производиться и в дроссельном вентиле V без совершения полезной работы. При дросселировании энтальпия рабочего агента остается постоянной, а температура снижается с T_k до T_0 (процесс 3 - 4'').

После детандера или дроссельного вентиля охлажденный рабочий агент подается в испаритель IV для отвода тепла от объекта охлаждения. Таким образом, в установке осуществляется обратный цикл и происходит отвод тепла от объекта охлаждения на низко потенциальном температурном уровне $T_0 < T_{окр.ср}$.

При замене детандера дроссельным вентилем значительно упрощается установка, но не происходит совершение полезной работы и уменьшается холодопроизводительность.

Количество энергии, отводимой от установки, равняется количеству энергии, подводимой к установке:

$$Q_0 + L_k = Q_k + L_d,$$

или в удельном виде, по отношению к единице массы:

$$q_k - q_0 = l_k - l_d,$$

где q_0, Q_0 - удельная (кДж/кг) и полная (кВт) холодопроизводительность установки соответственно;

q_k, Q_k - удельное (кДж/кг) и полное (кВт) количество теплоты, отводимое от рабочего агента в конденсаторе установки;

l_k, L_k - удельная (кДж/кг) и полная (кВт) работа сжатия рабочего агента в компрессоре;

l_d, L_d - удельная (кДж/кг) и полная (кВт) работа расширения рабочего агента в детандере.

Полная холодопроизводительность установки, кВт:

$$Q_0 = G_{pa} \cdot q_0 = G_{pa} \cdot (h_1 - h_4),$$

где G_{pa} - массовый расход рабочего агента, циркулирующего в элементах установки, кг/с;

h_1, h_4 - энтальпия рабочего агента на выходе и на входе в испаритель, кДж/кг.

Полное количество теплоты, отводимое от рабочего агента в конденсаторе, кВт:

$$Q_k = G_{pa} \cdot q_k = G_{pa} \cdot (h_2 - h_3),$$

где h_2, h_3 - энтальпия рабочего агента на входе и на выходе из конденсатора, кДж/кг.

Энтальпия рабочего агента в точке 2 определяется как:

$$h_2 = h_1 + \frac{h'_2 - h_1}{\eta_{ik}},$$

где h'_2 - энтальпия рабочего агента на выходе из компрессора в случае изоэнтропного (идеального) процесса сжатия, кДж/кг;

η_{ik} - внутренний КПД компрессора.

Полная работа сжатия рабочего агента в компрессоре, кВт:

$$L_k = G_{pa} \cdot l_k = \frac{G_{pa} \cdot (h_2 - h_1)}{\eta_{эм.к}},$$

где $\eta_{эм.к}$ - электромеханический КПД компрессора.

Полная работа расширения рабочего агента в детандере, кВт:

$$L_d = G_{pa} \cdot l_d = G_{pa} \cdot (h_3 - h_4) \cdot \eta_{эм.д},$$

где $\eta_{эм.д}$ - электромеханический КПД детандера.

Удельная работа цикла установки, кДж/кг:

$$l_u = l_k - l_d$$

Полная работа цикла установки, кВт:

$$L_u = G_{pa} \cdot l_u = L_k - L_d$$

При расширении рабочего агента в дроссельном вентиле работа цикла равняется работе сжатия рабочего агента в компрессоре.

Отношение полной холодопроизводительности установки к полной работе цикла называется холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L_{\text{ц}}} = \frac{G_{\text{ра}} \cdot q_0}{G_{\text{ра}} \cdot l_{\text{ц}}}$$

При постоянном массовом расходе рабочего агента во всех элементах установки холодильный коэффициент определяется как:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{\text{ц}}}$$

Величина, обратная холодильному коэффициенту, называется удельным расходом электроэнергии на единицу холодопроизводительности установки:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{L_{\text{ц}}}{Q_0}$$

В процессе расчета холодильной установки необходимо определить следующие величины:

- параметры рабочего агента в характерных точках схемы (P, T, h, s, v);
- удельную и полную тепловую нагрузку испарителя (q_0, Q_0);
- массовый расход рабочего агента;
- удельную и полную тепловую нагрузку конденсатора (q_k, Q_k);
- удельную и полную работу компрессора (l_k, L_k);
- удельную и полную работу детандера (l_d, L_d);
- удельную и полную работу цикла установки ($l_{\text{ц}}, L_{\text{ц}}$);
- холодильный коэффициент установки;
- удельный расход электроэнергии на единицу вырабатываемого холода;
- электрические мощности компрессора и детандера.

4. Порядок проведения работы

4.1. Исходные данные берутся студентом из таблицы 1 Приложения. Номер по журналу соответствует номеру варианта исходных данных.

4.2. Для заданного рабочего агента по T,S - диаграмме определяются параметры рабочего агента в характерных точках схемы ПЖКХУ (P, T, h, s, v).

4.3. Составляется блок-схема и разрабатывается программа расчета цикла работы ПЖКХУ.

4.3. При помощи разработанной программы просчитывается:

- цикл ПЖКХУ при различной температуре испарения рабочего агента. Температура конденсации рабочего агента остается неизменной. По результатам расчета строится зависимость холодильного коэффициента от температуры испарения рабочего агента:

$$\varepsilon = f_1(t_{исп});$$

- цикл ПЖКХУ при различной температуре конденсации рабочего агента. Температура испарения рабочего агента остается неизменной. По результатам расчета строится зависимость холодильного коэффициента от температуры конденсации рабочего агента:

$$\varepsilon = f_2(t_{конд})$$

4.5. Производится анализ полученных результатов и делаются выводы по проделанной работе.

5. Требования к отчету

Отчет по работе выполняется каждым студентом и должен содержать:

5.1. Краткое описание целей работы и основные расчетные зависимости.

5.2. Блок-схему и программу расчета цикла работы ПЖКХУ.

5.3. Исходные данные и результаты расчета. Результаты расчета должны быть представлены в виде таблиц 5.1, 5.2 и 5.3.

Таблица 5.1.

Параметры рабочего агента в характерных точках схемы

Характерные точки схемы	Параметры рабочего агента				
	P, МПа	t, °С	h, кДж/кг	s, кДж/(кг°С)	v, м ³ /кг
1					
2					
3					
4					

Таблица 5.2.

Результаты расчета цикла работы ПЖКХУ при $t_{конд} = const$

$t_{исп.}, °С$	$t_{конд.}, °С$	$Q_o, кВт$	$Q_k, кВт$	$L_k, кВт$	$L_d, кВт$	$L_{ц}, кВт$	$N_k, кВт$	$N_d, кВт$	ε_x	ε
	—									
	—									
	—									

Таблица 5.3.

Результаты расчета цикла работы ПЖКХУ при $t_{исп} = const$

$t_{исп.}, °С$	$t_{конд.}, °С$	$Q_o, кВт$	$Q_k, кВт$	$L_k, кВт$	$L_d, кВт$	$L_{ц}, кВт$	$N_k, кВт$	$N_d, кВт$	ε_x	ε
—										
—										
—										

5.4. Расчетные зависимости: $\varepsilon = f_1(t_{исп})$ и $\varepsilon = f_2(t_{конд})$.

5.5. Выводы по проделанной работе.

6. Контрольные вопросы для защиты работы

1. Схема и процессы работы одноступенчатой идеальной ПЖКХУ.
2. Схема и процессы работы одноступенчатой реальной ПЖКХУ.
3. Отличия идеальной и реальной ПЖКХУ.
4. Регенеративный теплообмен в ПЖКХУ.
5. Многоступенчатые ПЖКХУ.
6. Достоинства и недостатки многоступенчатых ПЖКХУ.
7. Каскадные ПЖКХУ.
8. Общая характеристика рабочих агентов, применяемых в ПЖКХУ.
9. Хладоносители, применяемые в ПЖКХУ.
10. Назначение нагнетательных и расширительных машин, используемых в ПЖКХУ.

Примечание: теоретические материалы по теме работы изучаются на лекционных занятиях и подробно изложены в литературе, рекомендуемой в рабочей программе дисциплины.

ЗАДАНИЕ №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА РАБОТЫ ГАЗОВОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1. Цель работы

Исследование цикла работы газовой компрессионной холодильной установки (ГКХУ) при различной температуре рабочего агента на входе в компрессор и на выходе из охладителя. Определение зависимости холодильного коэффициента установки от температуры рабочего агента на входе в компрессор и на выходе из охладителя.

2. Задание

2.1. Изучить указания к выполнению данной работы.

2.2. Разработать блок-схему и программу для расчета цикла работы ГКХУ.

2.3. Согласно исходным данным, просчитать:

- цикл ГКХУ при различной температуре газа на входе в компрессор, оставляя неизменным давление рабочего агента в нагревателе и охладителе установки, температуру газа на входе в нагреватель и температуру газа на выходе из охладителя. По результатам расчета построить зависимость холодильного коэффициента от температуры газа на входе в компрессор:

$$\varepsilon = f_1(t_1);$$

- цикл ГКХУ при различной температуре газа на выходе из охладителя, оставляя неизменными степень повышения давления газа в компрессоре и температуру газа на входе в компрессор. По результатам расчета построить зависимость холодильного коэффициента от температуры охлаждения рабочего агента в охладителе:

$$\varepsilon = f_2(t_3)$$

2.3. Провести анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы.

2.4. Оформить отчет согласно требованиям, предъявляемым к оформлению отчета.

3. Указания к выполнению работы

Принципиальная схема и цикл работы в T,S - диаграмме ГКХУ приведены на рис. 1. При работе ГКХУ не происходит изменения агрегатного состояния рабочего агента. Во всех элементах установки рабочий агент находится в состоянии газа.

Установка работает следующим образом. Тепло от объекта охлаждения на низко потенциальном температурном уровне T_n подводится к рабочему агенту в нагревателе IV. В результате подвода теплоты температура рабочего агента повышается при постоянном давлении p_n от T_4 до T_1 . После нагревания рабочий

агент поступает в компрессор I, где в результате подвода внешней работы происходит его сжатие и повышение давления с p_n до p_m . В реальном компрессоре процесс сжатия рабочего агента 1-2 не совпадает с изоэнтропным (идеальным) сжатием 1-2'. При этом, работа, затрачиваемая на сжатие рабочего агента в реальном компрессоре будет больше, чем при идеальном процессе сжатия. После компрессора сжатый рабочий агент при давлении p_m поступает в охладитель II, где в результате отвода тепла от рабочего агента к теплоприемнику (в окружающую среду), температура рабочего агента снижается от T_2 до T_3 при постоянном давлении p_m . Охлажденный рабочий агент после охладителя при давлении p_m и температуре T_3 поступает на расширение в детандер III.

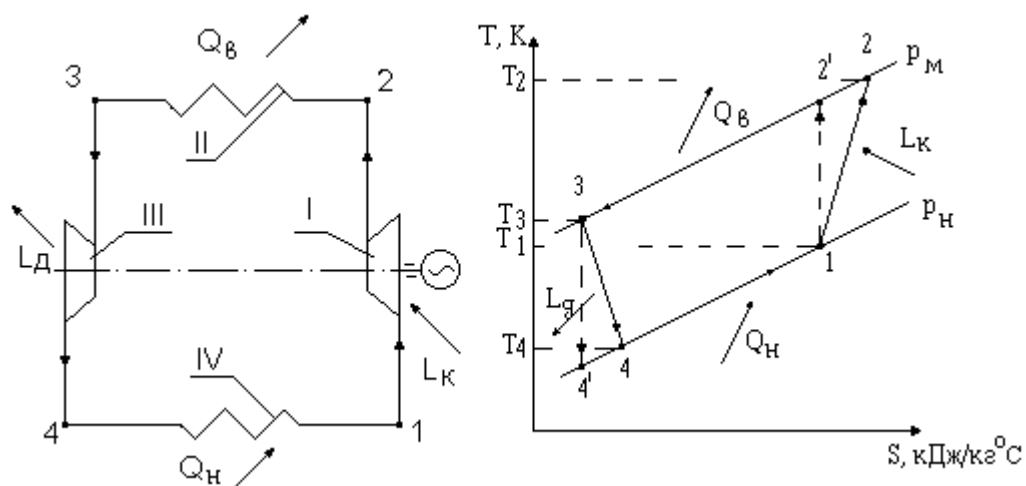


Рис. 1. Принципиальная схема ГКХУ и процессы работы в T,S - диаграмме
 I - компрессор; II - охладитель; III - детандер; IV - нагреватель

В результате расширения рабочего агента в детандере с совершением полезной работы, его давление снижается с p_m до p_n и температура уменьшается с T_3 до T_4 . Из-за наличия необратимых потерь процесс расширения в детандере 3-4 не совпадает с изоэнтропным (идеальным) расширением 3-4'.

После детандера рабочий агент подается в нагреватель IV, где к нему подводится теплота от объекта охлаждения. Таким образом в установке вырабатывается холод и осуществляется процесс повышения потенциала тепла с низко потенциального температурного уровня $T_n < T_{окр.ср}$ до более высокого температурного уровня $T_в = T_{окр.ср}$.

Удельная холодопроизводительность установки, кДж/кг:

$$q_n = h_1 - h_4 = Cp \cdot (T_1 - T_4),$$

где h_1, h_4 - энтальпия рабочего агента на выходе и на входе в нагреватель соответственно, кДж/кг;

C_p - изобарная теплоемкость рабочего агента, кДж/кг⁰С;

T_1, T_4 - температура рабочего агента на выходе и на входе в нагреватель соответственно, ⁰С.

Удельная тепловая нагрузка охладителя, кДж/кг:

$$q_v = h_2 - h_3 = C_p \cdot (T_2 - T_3),$$

где h_2, h_3 - энтальпия рабочего агента на входе и на выходе из охладителя соответственно, кДж/кг;

T_2, T_3 - температура рабочего агента на входе и на выходе из охладителя соответственно, ⁰С.

Удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг:

$$l_k = h_2 - h_1 = C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Удельная работа расширения в детандере, кДж/кг:

$$l_d = h_3 - h_4 = C_p \cdot (T_3 - T_4)$$

Удельная работа цикла установки, кДж/кг:

$$l_u = l_k - l_d$$

Полные тепловые нагрузки теплообменных аппаратов (нагревателя и охладителя) и полные работы сжатия, расширения и цикла определяются произведением соответствующих удельных величин на массовый расход рабочего агента, циркулирующего в элементах установки.

Полная холодопроизводительность установки, кВт:

$$Q_n = q_n \cdot G_{pa},$$

где G_{pa} - массовый расход рабочего агента, кг/с.

Полная тепловая нагрузка охладителя, кВт:

$$Q_v = q_v \cdot G_{pa}$$

Полная работа компрессора, кВт:

$$L_k = l_k \cdot G_{pa}$$

Полная работа детандера, кВт:

$$L_d = l_d \cdot G_{pa}$$

Полная работа цикла установки, кВт:

$$L_u = l_u \cdot G_{pa}$$

Энергетический баланс установки:

$$q_v - q_n = l_k - l_d = l_u$$

Отношение полной холодопроизводительности установки к полной работе цикла называется холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_n}{L_u} = \frac{G_{pa} \cdot q_n}{G_{pa} \cdot l_u}$$

При постоянном массовом расходе во всех элемента установки $G_{pa} = const$, тогда холодильный коэффициент определяется как:

$$\varepsilon = \frac{q_n}{l_u}$$

Величина, обратная холодильному коэффициенту, называется удельным расходом электроэнергии на единицу холодопроизводительности установки:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{L_u}{Q_n}$$

В процессе расчета холодильной установки необходимо определить следующие величины:

- параметры рабочего агента в характерных точках схемы (P, T, h, s, v);
- удельную холодопроизводительность установки;
- массовый расход рабочего агента;
- удельную и полную тепловую нагрузку охладителя;
- удельную и полную работу компрессора;
- удельную и полную работу детандера;
- удельную и полную работу цикла ГКХУ;
- холодильный коэффициент установки;
- удельный расход электроэнергии на единицу вырабатываемого холода.

Примечание: при расчете установки принимается:

- Рабочим агентом является воздух.
- Изобарная теплоемкость воздуха: $C_p = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}} = const$
- Показатель адиабаты: $K = 1,4$.
- Удельная энтропия воздуха при нормальных условиях:
- $S_{н.у.} = S_{(p,t)} = S_{(0,1;20)} = 6,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$
- Теплообменные аппараты установки являются идеальными (тепловые и гидравлические потери не учитываются).

4. Порядок проведения работы

4.1. Исходные данные берутся студентом из таблицы 2 Приложения. Номер по журналу соответствует номеру варианта исходных данных.

4.2. Для заданного рабочего агента (воздух) по T, S - диаграмме определяются параметры в характерных точках схемы ГКХУ (P, T, h, s, v).

4.3. Составляется блок-схема и программа расчета цикла работы ГКХУ.

4.4. При помощи разработанной программы просчитывается:

- цикл ГКХУ при различной температуре газа на входе в компрессор. Давление рабочего агента в нагревателе и охладителе установки, температура газа на входе в нагреватель и температура газа на выходе из охладителя остаются неизменными. По результатам расчета строится зависимость холодильного коэффициента от температуры газа на входе в компрессор:

$$\varepsilon = f_1(t_1);$$

- цикл ГКХУ при различной температуре газа на выходе из охладителя. Неизменными остаются: степень повышения давления газа в компрессоре и температура газа на входе в компрессор. По результатам расчета строится зависимость холодильного коэффициента от температуры охлаждения рабочего агента в охладителе:

$$\varepsilon = f_2(t_3)$$

4.5. Производится анализ полученных результатов и делаются выводы по проделанной работе.

5. Требования к отчету

Отчет по работе выполняется каждым студентом и должен содержать:

5.1. Краткое описание целей работы и основные расчетные зависимости.

5.2. Блок-схему и программу расчета цикла работы ГКХУ.

5.3. Исходные данные и результаты расчета. Результаты расчета представляются в виде таблиц 5.1, 5.2 и 5.3.

Таблица 5.1.

Параметры рабочего агента в характерных точках схемы

Характерные точки схемы	Параметры рабочего агента				
	P, МПа	t, °C	h, кДж/кг	s, кДж/(кг°C)	v, м ³ /кг
1					
2					
3					
4					

Таблица 5.2.

Результаты расчета цикла работы ГКХУ при $t_3 = const$

t ₁ , °C	t ₃ , °C	Q _н , кВт	Q _в , кВт	L _к , кВт	L _д , кВт	L _ц , кВт	η _х	ε
	—							
	—							
	—							

Таблица 5.3.

Результаты расчета цикла работы ГКХУ при $t_1 = const$

t ₁ , °C	t ₃ , °C	Q _н , кВт	Q _в , кВт	L _к , кВт	L _д , кВт	L _ц , кВт	η _х	ε

—								
—								
—								

5.4. Расчетные зависимости: $\varepsilon = f_1(t_1)$ и $\varepsilon = f_2(t_3)$.

5.5. Выводы по проделанной работе.

6. Контрольные вопросы для защиты работы

1. Идеальный цикл Карно одноступенчатой ГКХУ.
2. Идеальный цикл Джоуля одноступенчатой ГКХУ.
3. Реальный цикл Джоуля одноступенчатой ГКХУ.
4. Реальная ГКХУ с квазициклом.
5. Достоинства и недостатки одноступенчатых ГКХУ.
6. Рабочие агенты, применяемые в ГКХУ.
7. Нагнетательные и расширительные машины, применяемые в ГКХУ.

Примечание: теоретические материалы по теме работы изучаются на лекционных занятиях и подробно изложены в литературе, рекомендуемой в рабочей программе дисциплины.

ЗАДАНИЕ №3

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ГАЗОВЫХ КОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

1. Цель работы

Исследование цикла работы газовой компрессионной холодильной установки с регенеративным теплообменом (ГКХУРТ) при различной степени регенерации. Выяснить влияние регенеративного теплообмена на холодопроизводительность, работу цикла и холодильный коэффициент установки.

2. Задание

2.1. Изучить указания к выполнению данной работы.

2.2. Разработать блок-схему и программу для расчета цикла работы ГКХУРТ.

2.3. Согласно исходным данным, просчитать:

- цикл ГКХУРТ при различной степени регенерации рабочего агента, оставляя неизменным давление рабочего агента в нагревателе и охладителе установки, температуру газа на входе в нагреватель и температуру газа на выходе из охладителя. По результатам расчета построить зависимость холодильного коэффициента установки от степени регенерации:

$$\varepsilon = f(\sigma)$$

2.3. Провести анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы.

2.4. Оформить отчет согласно требованиям, предъявляемым к оформлению отчета.

3. Указания к выполнению работы

Для получения холода более низкого потенциала с помощью газовой холодильной установки и уменьшения количества энергии, требуемой для работы установки, необходимо уменьшить температуру газа на входе в детандер. Охлаждение газа перед детандером осуществляется потоком газа, выходящим из нагревателя в регенеративном теплообменнике. При этом температура газа на входе в детандер снижается до T_n , а температура газа, поступающего в компрессор увеличивается до $T_v = T_{окр.ср}$.

При применении регенеративного теплообмена уменьшается работа сжатия в компрессоре, т.к. уменьшается степень повышения давления рабочего агента. Принципиальная схема и процессы работы ГКХУРТ в T,S - диаграмме приведены на рис. 1.

Установка работает следующим образом. Тепло от объекта охлаждения на низко потенциальном температурном уровне T_n подводится к рабочему агенту в нагревателе V. В результате подвода теплоты температура рабочего агента

повышается при постоянном давлении p_1 от T_5 до T_6 . После нагревания рабочий агент поступает в регенеративный теплообменник III, где происходит его дальнейшее нагревание до температуры T_1 за счет отвода теплоты $Q_{рег}$ от холодного потока газа, движущегося из охладителя II.

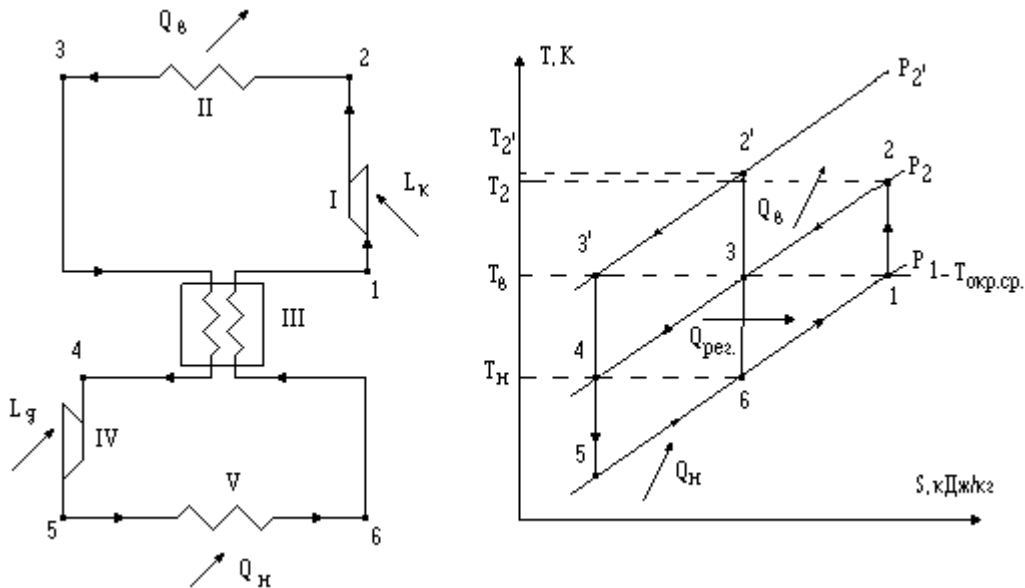


Рис.3.1. Принципиальная схема ГКХУРТ и процессы работы в T,S - диаграмме
 I - компрессор; II - охладитель; III - регенеративный теплообменник; IV - детандер; V - нагреватель.

Затем рабочий агент поступает в компрессор I, где в результате подвода внешней работы происходит его сжатие и повышение давления с p_1 до p_2 . После компрессора сжатый рабочий агент при давлении p_2 поступает в охладитель II, где благодаря отводу тепла от рабочего агента к теплоприемнику (в окружающую среду), температура рабочего агента снижается от T_2 до T_3 при постоянном давлении p_2 . Охлажденный рабочий агент после охладителя при давлении p_2 и температуре T_3 поступает в регенеративный теплообменник III, где отдает свое тепло встречному потоку газа, движущемуся из нагревателя. При этом его температура понижается с T_3 до T_4 . Далее рабочий агент поступает на расширение в детандер IV.

В результате расширения рабочего агента в детандере с совершением полезной работы, его давление снижается с p_2 до p_1 и температура уменьшается с T_4 до T_5 . После детандера рабочий агент подается в нагреватель V, где к нему подводится теплота от объекта охлаждения.

Цикл 6 - 2' - 3' - 5 - 6: газовый цикл без применения регенерации теплоты (степень регенерации: $\sigma = 0$).

Цикл 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 1: газовый цикл с предельной регенерацией (степень регенерации: $\sigma = 1$).

Степень регенерации - это отношение действительного количества теплоты ($Q_{рег.действ.}$), переданного в регенеративном теплообменном аппарате к максимально возможному ($Q_{рег.возм.}$):

$$\sigma = \frac{Q_{рег.действ.}}{Q_{рег.возм.}} = \frac{q_{рег.действ.}}{q_{рег.возм.}} = \frac{h_1 - h_6}{h'_3 - h_6} = \frac{Cp \cdot (T_1 - T_6)}{Cp \cdot (T'_3 - T_6)}$$

Удельная холодопроизводительность установки, кДж/кг:

$$q_n = h_6 - h_5 = Cp \cdot (T_6 - T_5),$$

где h_5, h_6 - энтальпия рабочего агента на входе и на выходе из нагревателя соответственно, кДж/кг;

Cp - изобарная теплоемкость рабочего агента, кДж/кг⁰С;

T_5, T_6 - температура рабочего агента на входе и на выходе из нагревателя соответственно, ⁰С.

Удельная тепловая нагрузка охладителя, кДж/кг:

$$q_e = h_2 - h_3 = Cp \cdot (T_2 - T_3),$$

где h_2, h_3 - энтальпия рабочего агента на входе и на выходе из охладителя соответственно, кДж/кг;

T_2, T_3 - температура рабочего агента на входе и на выходе из охладителя соответственно, ⁰С.

Удельная тепловая нагрузка регенеративного теплообменника, кДж/кг:

$$q_{рег} = h_1 - h_6 = h_3 - h_4 = Cp \cdot (T_1 - T_6) = Cp \cdot (T_3 - T_4),$$

где h_1 - энтальпия рабочего агента на входе в компрессор, кДж/кг;

h_4 - энтальпия рабочего агента на входе в детандер, кДж/кг;

T_1 - температура рабочего агента на входе в компрессор, ⁰С;

T_4 - температура рабочего агента на входе в детандер, ⁰С.

Удельная работа сжатия в компрессоре, кДж/кг:

$$l_k = h_2 - h_1 = Cp \cdot (T_2 - T_1)$$

Удельная работа расширения в детандере, кДж/кг:

$$l_d = h_4 - h_5 = Cp \cdot (T_4 - T_5)$$

Удельная работа цикла установки, кДж/кг:

$$l_u = l_k - l_d$$

Полные тепловые нагрузки теплообменных аппаратов (нагреватель, охладитель и регенеративный теплообменник) и полные работы сжатия, расширения и цикла определяются произведением соответствующих удельных величин на массовый расход рабочего агента, циркулирующего в элементах установки.

Полная холодопроизводительность установки, кВт:

$$Q_n = q_n \cdot G_{pa},$$

где G_{pa} - массовый расход рабочего агента, кг/с.

Полная тепловая нагрузка охладителя, кВт:

$$Q_v = q_v \cdot G_{pa}$$

Полная тепловая нагрузка регенеративного теплообменника, кВт:

$$Q_{рег} = q_{рег} \cdot G_{pa}$$

Полная работа компрессора, кВт:

$$L_k = l_k \cdot G_{pa}$$

Полная работа детандера, кВт:

$$L_d = l_d \cdot G_{pa}$$

Полная работа цикла установки, кВт:

$$L_{ц} = l_{ц} \cdot G_{pa}$$

Энергетический баланс установки:

$$q_v - q_n = l_k - l_d = l_{ц}$$

Отношение полной холодопроизводительности установки к полной работе цикла называется холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_n}{L_{ц}} = \frac{G_{pa} \cdot q_n}{G_{pa} \cdot l_{ц}}$$

При постоянном массовом расходе во всех элемента установки $G_{pa} = const$, тогда холодильный коэффициент определяется как:

$$\varepsilon = \frac{q_n}{l_{ц}}$$

Величина, обратная холодильному коэффициенту, называется удельным расходом электроэнергии на единицу холодопроизводительности установки:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{L_{ц}}{Q_n}$$

В процессе расчета холодильной установки необходимо определить следующие величины:

- параметры рабочего агента в характерных точках схемы (P, T, h, s, v);
- удельную холодопроизводительность установки;
- массовый расход рабочего агента;
- удельную и полную тепловую нагрузку охладителя;
- удельную и полную тепловую нагрузку регенеративного теплообменника;
- удельную и полную работу компрессора;
- удельную и полную работу детандера;

- удельную и полную работу цикла ГКХУ;
- холодильный коэффициент установки;
- удельный расход электроэнергии на единицу вырабатываемого холода.

Примечание: При расчете установки принимается:

- Рабочим агентом является воздух.

- Изобарная теплоемкость воздуха: $C_p = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^0\text{С}} = \text{const}$

- Показатель адиабаты: $K = 1,4$.

- Удельная энтропия воздуха при нормальных условиях:

$$S_{н.у.} = S_{(p,t)} = S_{(0,1;20)} = 6,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^0\text{С}}$$

- Теплообменные аппараты установки являются идеальными (тепловые и гидравлические потери не учитываются).

4. Порядок проведения работы

4.1. Исходные данные берутся студентом из таблицы 3 Приложения. Номер по журналу соответствует номеру варианта исходных данных.

4.2. Для заданного рабочего агента (воздух) по T,S - диаграмме определяются параметры в характерных точках схемы ГКХУРТ (P, T, h, s, v).

4.3. Составляется блок-схема и программа расчета цикла работы ГКХУРТ.

4.4. При помощи разработанной программы просчитывается:

- цикл ГКХУРТ при различной степени регенерации рабочего агента. Давление рабочего агента в нагревателе и охладителе установки, температура газа на входе в нагреватель и температура газа на выходе из охладителя остаются неизменными. По результатам расчета строится зависимость холодильного коэффициента от степени регенерации:

$$\varepsilon = f(\sigma)$$

4.5. Производится анализ полученных результатов и делаются выводы по проделанной работе.

5. Требования к отчету

Отчет по работе выполняется каждым студентом и должен содержать:

5.1. Краткое описание целей работы и основные расчетные зависимости.

5.2. Блок-схему и программу расчета цикла работы ГКХУРТ.

5.3. Исходные данные и результаты расчета. Результаты расчета представляются в виде таблиц 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1.

Параметры рабочего агента в характерных точках схемы

Характерные	Параметры рабочего агента
-------------	---------------------------

точки схемы					
	P, МПа	t, °С	h, кДж/кг	s, кДж/(кг°С)	v, м ³ /кг
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Таблица 5.2.

Результаты расчета цикла работы ГКХУРТ

σ	$\Delta\sigma$	$Q_{ц}$, кВт	$Q_{в}$, кВт	$L_{к}$, кВт	$L_{д}$, кВт	$L_{ц}$, кВт	ε_x	ε

5.4. Расчетную зависимость: $\varepsilon = f(\sigma)$.

5.5. Выводы по проделанной работе.

6. Контрольные вопросы

1. Схема и процессы работы ГКХУРТ в T,S - диаграмме.
2. Отличия ГКХУ от ГКХУРТ.
3. Достоинства и недостатки ГКХУРТ.
4. Область использования ГКХУРТ.
5. Рабочие агенты, используемые в ГКХУРТ.
6. Нагнетательные и расширительные машины, применяемые в ГКХУРТ.
7. Регенеративные теплообменники, используемые в ГКХУРТ.
8. Многоступенчатое сжатие в ГКХУ.
9. Схема и процессы работы в T,S - диаграмме двухступенчатой реальной ГКХУ.
10. Достоинства и недостатки многоступенчатых ГКХУ.

Примечание: теоретические материалы по теме работы изучаются на лекционных занятиях и подробно изложены в литературе, рекомендуемой в рабочей программе дисциплины.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.

Исходные данные к работе №1

№	Раб. агент	Q _о , кВт	η _{ик} , %	η _{эм.к} , %	η _{ид} , %	η _{эмд} , %	t _{конд.} , °С	Δt _{исп.} , °С от-до	δ _{исп.} , °С	t _{исп.} , °С	Δt _{конд.} , °С от-до	δ _{конд.} , °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	NH ₃	15	80	92	83	92	20	-35;-23	3	-24	15;23	2
2	R12	16	81	93	---	---	26	-34;-18	4	-21	16;28	3
3	NH ₃	17	82	95	82	93	30	-20;-12	2	-12	16;40	6
4	R12	18	83	94	---	---	32	-33;-13	5	-26	20;28	2
5	NH ₃	19	84	91	85	96	16	-44;-28	4	-18	17;29	3
6	R12	20	85	90	---	---	39	-36;-12	6	-34	15;35	5
7	NH ₃	21	80	92	84	95	34	-21;-9	3	-10	32;40	2
8	R12	22	81	91	---	---	31	-46;-18	7	-29	16;32	4
9	NH ₃	23	82	93	83	93	28	-24;-8	4	-13	20;40	5
10	R12	24	83	95	---	---	33	-44;-12	8	-22	15;39	6
11	NH ₃	25	84	94	80	90	15	-40;-20	5	-33	16;32	4
12	R12	26	85	94	---	---	24	-40;-24	4	-28	15;27	3
13	NH ₃	27	80	92	82	91	32	-20;-8	3	-17	25;33	2
14	R12	28	81	93	---	---	23	-54;-38	4	-32	28;40	3
15	NH ₃	29	82	91	81	91	21	-30;-22	2	-23	15;39	6
16	R12	30	83	90	---	---	35	-58;-38	5	-19	30;38	2
17	NH ₃	31	84	91	80	90	25	-24;-8	4	-11	29;41	3
18	R12	32	85	93	---	---	29	-60;-26	6	-27	21;41	5
19	NH ₃	33	80	95	83	93	19	-36;-24	3	-14	22;30	2
20	R12	34	81	92	---	---	36	-55;-27	7	-31	24;40	4
21	NH ₃	35	82	91	85	94	17	-44;-28	4	-20	15;35	5
22	R12	36	83	93	---	---	38	-62;-30	8	-16	16;40	6
23	NH ₃	37	84	95	82	95	22	-30;-10	5	-15	25;41	4
24	R12	38	85	94	---	---	18	-60;-44	4	-30	27;39	3

Обозначения, принятые в таблице 1:

Q_о - полная холодопроизводительность установки;

η_{ик} - внутренний КПД компрессора;

η_{эм.к} - электромеханический КПД компрессора;

η_{ид} - внутренний КПД детандера;

η_{эм.д} - электромеханический КПД детандера;

t_{конд.} - температура конденсации рабочего агента;

Δt_{исп.} - диапазон изменения температуры испарения рабочего агента;

δ_{исп.} - шаг изменения температуры испарения рабочего агента;

t_{исп.} - температура испарения рабочего агента;

Δt_{конд.} - диапазон изменения температуры конденсации рабочего агента;

δ_{конд.} - шаг изменения температуры конденсации рабочего агента.

Таблица 2.

Исходные данные к работе №2

№	Q_n , кВт	η_{ik} , %	$\eta_{эмк}$, %	$\eta_{ид}$, %	$\eta_{эмд}$, %	P_1 , МПа	t_3 , °С	t_4 , °С	Δt_1 , °С от-до	δ_1 , °С	t_1 , °С	β	Δt_3 , °С от-до	δ_3 , °С	$S_{ну}$, кДж/кгК
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	40	81	93	84	96	0,12	24	-30	-20;-12	2	-14	3	18;34	4	6,80
2	50	82	94	85	97	0,14	18	-36	-24;-12	3	-13	4	17;25	2	6,82
3	60	83	95	86	95	0,16	23	-31	-22;-6	4	-8	5	16;28	3	6,84
4	70	84	92	81	94	0,18	17	-37	-23;-11	3	-12	6	15;23	2	6,86
5	80	85	91	82	98	0,20	22	-32	-21;-5	4	-6	4	19;31	3	6,88
6	90	82	93	83	93	0,11	16	-38	-28;-20	2	-10	5	16;32	4	6,79
7	100	83	94	84	95	0,13	21	-33	-25;-9	4	-4	6	18;30	3	6,81
8	110	85	93	85	96	0,15	15	-39	-16;-8	2	-2	3	15;31	4	6,83
9	120	84	95	86	97	0,17	20	-34	-19;-7	3	0	5	19;27	2	6,85
10	130	81	92	87	92	0,19	23	-40	-26;-18	2	-7	6	17;33	4	6,87
11	140	80	94	82	94	0,10	19	-35	-22;-10	3	-3	3	16;26	2	6,78
12	150	81	95	81	98	0,09	22	-41	-24;-8	4	-1	4	20;32	3	6,77
13	45	82	94	84	95	0,19	16	-47	-27;-15	3	-9	6	16;24	2	6,87
14	55	83	93	85	93	0,17	21	-42	-30;-14	4	-5	3	17;29	3	6,85
15	65	85	92	86	92	0,15	15	-48	-32;-24	2	-16	4	15;31	4	6,83
16	75	84	91	85	91	0,13	20	-43	-26;-10	4	-4	5	19;30	3	6,81
17	85	83	93	84	96	0,11	19	-49	-34;-26	2	-15	3	18;34	4	6,79
18	95	82	95	83	94	0,20	24	-44	-21;-9	3	-3	4	21;29	2	6,88
19	105	81	94	82	97	0,18	18	-50	-18;-10	2	-6	5	16;32	4	6,86
20	115	84	92	81	95	0,16	23	-45	-29;-17	3	-5	6	18;26	2	6,84
21	125	85	92	87	92	0,14	17	-51	-25;-19	4	-9	4	16;28	3	6,82
22	135	80	96	85	98	0,12	22	-46	-33;-21	3	-2	5	17;25	2	6,80
23	145	85	94	86	93	0,10	16	-52	-31;-15	4	-1	6	16;28	3	6,78
24	155	84	97	82	96	0,09	15	-53	-22;-14	2	-10	3	15;31	4	6,77

Обозначения, принятые в таблице 2:

Q_n - полная холодопроизводительность установки;

η_{ik} - внутренний КПД компрессора;

$\eta_{эмк}$ - электромеханический КПД компрессора;

$\eta_{ид}$ - внутренний КПД детандера;

$\eta_{эм.д}$ - электромеханический КПД детандера;

P_1 - давление рабочего агента в нагревателе;

t_3 - температура рабочего агента на выходе из охладителя;

t_4 - температура рабочего агента на входе в нагреватель;

Δt_1 - диапазон изменения температуры рабочего агента на входе в компрессор;

δ_1 - шаг изменения температуры рабочего агента на входе в компрессор;

t_1 - температура рабочего агента на входе в компрессор;

β - степень повышения давления рабочего агента в компрессоре

Δt_3 - диапазон изменения температуры рабочего агента на выходе из охладителя;

δ_3 - шаг изменения температуры рабочего агента на выходе из охладителя;

$S_{н.у.}$ - удельная энтропия газа при давлении на входе в компрессор P_1 и температуре 20 °С.

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



Таблица 3.

Исходные данные к работе №3

№	Q_H , кВт	P_1 , МПа	t_6 , °С	$s_{(p,t)}$, кДж/кгК	$t_{o.c.}$, °С	t_5 , °С	σ	$\Delta\sigma$	$\eta_{iк}$	$\eta_{эмк}$	$\eta_{iд}$	$\eta_{эмд}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	40	0,12	-14	6,80	24	-30	0 - 1	0,2	0,81	0,93	0,84	0,96
2	50	0,14	-13	6,82	18	-36	0 - 1	0,2	0,82	0,94	0,85	0,97
3	60	0,16	-8	6,84	23	-31	0 - 1	0,2	0,83	0,95	0,86	0,98
4	70	0,18	-12	6,86	17	-37	0 - 1	0,2	0,84	0,96	0,87	0,97
5	80	0,20	-6	6,88	22	-32	0 - 1	0,2	0,85	0,97	0,88	0,98
6	90	0,11	-10	6,79	16	-38	0 - 1	0,2	0,80	0,91	0,85	0,94
7	100	0,13	-4	6,81	21	-33	0 - 1	0,2	0,82	0,96	0,87	0,98
8	110	0,15	-2	6,83	15	-39	0 - 1	0,2	0,83	0,97	0,84	0,97
9	120	0,17	0	6,85	20	-34	0 - 1	0,2	0,84	0,92	0,86	0,94
10	130	0,19	-7	6,87	23	-40	0 - 1	0,2	0,85	0,93	0,88	0,95
11	140	0,10	-3	6,78	19	-35	0 - 1	0,2	0,80	0,94	0,84	0,96
12	150	0,09	-1	6,77	22	-41	0 - 1	0,2	0,81	0,95	0,83	0,97
13	45	0,19	-9	6,85	16	-47	0 - 1	0,2	0,83	0,90	0,85	0,93
14	55	0,17	-5	6,83	21	-42	0 - 1	0,2	0,84	0,91	0,87	0,95
15	65	0,15	-16	6,81	15	-48	0 - 1	0,2	0,85	0,93	0,88	0,96
16	75	0,13	-4	6,79	20	-43	0 - 1	0,2	0,80	0,92	0,86	0,94
17	85	0,11	-15	6,88	19	-49	0 - 1	0,2	0,81	0,95	0,84	0,97
18	95	0,20	-3	6,86	24	-44	0 - 1	0,2	0,82	0,94	0,85	0,96
19	105	0,18	-6	6,85	18	-50	0 - 1	0,2	0,84	0,97	0,88	0,98
20	115	0,16	-6	6,84	23	-45	0 - 1	0,2	0,85	0,96	0,87	0,97
21	125	0,14	-9	6,82	17	-51	0 - 1	0,2	0,80	0,93	0,83	0,96
22	135	0,12	-2	6,80	22	-46	0 - 1	0,2	0,81	0,95	0,84	0,98
23	145	0,10	-1	6,78	16	-52	0 - 1	0,2	0,82	0,92	0,86	0,94
24	155	0,09	-10	6,71	15	-53	0 - 1	0,2	0,83	0,94	0,87	0,97

Обозначения, принятые в таблице 3:

Q_H - полная холодопроизводительность установки;

P_1 - давление рабочего агента в нагревателе;

t_6 - температура рабочего агента на выходе из нагревателя;

$s_{(p,t)}$ - удельная энтропия газа при давлении в охладителе P_1 и температуре t_1 ;

$t_{o.c.}$ - температура окружающей среды;

t_5 - температура рабочего агента на входе в нагреватель;

σ - диапазон изменения степени регенерации;

$\Delta\sigma$ - шаг изменения степени регенерации;

$\eta_{iк}$ - относительный внутренний КПД компрессора;

$\eta_{эмк}$ - электромеханический КПД компрессора;

$\eta_{iд}$ - относительный внутренний КПД детандера;

$\eta_{эмд}$ - электромеханический КПД детандера.

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**Методические рекомендации
к выполнению расчетно-графической работы
по дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров
трансформаторов тепла»**

Смоленск

Цель выполнения расчетно-графической работы заключается в формировании знаний и умений, необходимых для выполнения расчетов схем одноступенчатых парожидкостных компрессионных трансформаторов тепла на примере холодильных установок, определения параметров рабочего агента в характерных точках схемы и расчета основных энергетических характеристик основных элементов схемы.

Задание:

1. Определить параметры рабочего агента в характерных точках схемы одноступенчатой парожидкостной компрессионной холодильной установки без регенеративного теплообменника (схема №1) и с ним (схема №2).
2. Определить удельные тепловые и энергетические нагрузки основных элементов схемы: испарителя, конденсатора и компрессора.
3. Определить полные тепловые и энергетические нагрузки основных элементов схемы: испарителя, конденсатора и компрессора.
4. Определить термодинамические показатели эффективности работы холодильных установок: холодильный коэффициент, удельный расход энергии на производство единицы холода и КПД.
5. Провести сравнительный анализ полученных результатов и сделать необходимые выводы.

Объектами рассмотрения являются:

- парожидкостная компрессионная холодильная установка без регенеративного теплообменного аппарата (схема №1). Рабочий агент аммиак – NH_3 ;
- парожидкостная компрессионная холодильная установка с регенеративным теплообменным аппаратом (схема №2). Рабочий агент – фреон R-12.

Исходные данные для выполнения расчетов представлены в табл. 1 и выбираются студентом согласно номеру по журналу.

Таблица 1

Исходные данные для расчета холодильных установок

№	Q_0 , кВт	$t_{н1}$, °C	$t_{н2}$, °C	$t_{в1}$, °C	$t_{в2}$, °C	$\Delta t_{н}$, °C	$\Delta t_{к}$, °C	$\Delta t_{р}$, °C	η_{is} , %	$\eta_{эм}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	5	-35	-42	20	15	5	3	15	0,80	0,95
2	14	-30	-36	18	14	4	4	14	0,81	0,94
3	7	-25	-32	16	12	3	5	13	0,82	0,93
4	13	-20	-26	14	10	2	6	12	0,83	0,92
5	9	-15	-22	12	8	5	3	11	0,84	0,91
6	15	-10	-16	22	17	4	4	10	0,85	0,90
7	11	-35	-42	20	15	3	5	15	0,80	0,95
8	8	-30	-36	18	14	2	6	14	0,81	0,94
9	12	-25	-32	16	12	5	3	13	0,82	0,93

10	6	-20	-26	14	10	4	4	12	0,83	0,92
11	10	-15	-22	12	8	3	5	11	0,84	0,91
12	16	-10	-16	22	17	2	6	10	0,85	0,90
13	9	-35	-42	20	15	5	3	15	0,80	0,95
14	17	-30	-36	18	14	4	4	14	0,81	0,94
15	10	-25	-32	16	12	3	5	13	0,82	0,93
16	18	-20	-26	14	10	2	6	12	0,83	0,92
17	11	-15	-22	12	8	5	3	11	0,84	0,91
18	5	-10	-16	22	17	4	4	10	0,85	0,90
19	12	-35	-42	20	15	3	5	15	0,80	0,95
20	6	-30	-36	18	14	2	6	14	0,81	0,94
21	14	-25	-32	16	12	5	3	13	0,82	0,93
22	7	-20	-26	14	10	4	4	12	0,83	0,92
23	15	-15	-22	12	8	3	5	11	0,84	0,91
24	8	-10	-16	22	17	2	6	10	0,85	0,90
25	17	-35	-42	20	15	5	3	15	0,80	0,95

Обозначения в таблице:

Q_0 – полная холодопроизводительность;

$t_{н1}$ – температура хладоносителя на входе в испаритель;

$t_{н2}$ – температура хладоносителя на выходе из испарителя;

$t_{в1}$ – температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора;

$t_{в2}$ – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор;

$\Delta t_{и}$ – конечная разность температур в испарителе;

$\Delta t_{к}$ – конечная разность температур в конденсаторе;

$\Delta t_{р}$ – конечная разность температур в регенеративном теплообменнике;

η_i – внутренний КПД компрессора;

$\eta_{эм}$ – электромеханический КПД компрессора.

Пример расчёта схемы №1

Исходные данные:

Q_0 , кВт	$t_{н1}$, °C	$t_{н2}$, °C	$t_{в1}$, °C	$t_{в2}$, °C	$\Delta t_{и}$, °C	$\Delta t_{к}$, °C	η_i , %	$\eta_{эм}$, %
17,45	-15	-22	25	20	3	5	0,80	0,90

1. По известным температурам хладоносителя и охлаждающей воды определяются температуры испарения и конденсации рабочего агента:

$$t_0 = t_{н2} - \Delta t_{и} = -22 - 3 = -25^{\circ}\text{C}$$

$$t_{к} = t_{в1} + \Delta t_{к} = 25 + 5 = 30^{\circ}\text{C}$$

2. По T-S диаграмме определяются параметры рабочего агента (аммиак) в характерных точках схемы:

Точка 1: $t_1 = t_0 = -25^\circ\text{C}$

$$P_1 = P_0 = 0,15 \text{ МПа}$$

$$h_1 = 1652 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$g_1 = 0,78 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Точка 2': $t_2' = 126^\circ\text{C}$

$$P_2' = P_k = P_3 = 1,2 \text{ МПа}$$

$$h_2' = 1960 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 3: $t_3 = t_k = 30^\circ\text{C}$

$$P_3 = P_k = 1,2 \text{ МПа}$$

$$h_3 = 562 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 4: $t_4 = t_0 = -25^\circ\text{C}$

$$P_4 = P_0 = P_1 = 0,15 \text{ МПа}$$

$$h_4 = h_3 = 562 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

3. Рассчитывается энтальпия рабочего агента в точке 2:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_2' - h_1}{\eta_i} = 1652 + \frac{1960 - 1652}{0,80} = 2040 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

4. Определяется удельная холодопроизводительность установки:

$$q_0 = h_1 - h_4 = 1652 - 562 = 1090 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

5. Находится массовый расход рабочего агента:

$$G_{pa} = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{17,45}{1090} = 0,016 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

6. Определяется удельная внутренняя работа компрессора:

$$l_g = h_2 - h_1 = 2040 - 1652 = 388 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

7. Определяется удельная тепловая нагрузка конденсатора:

$$q_k = h_2 - h_3 = 2040 - 562 = 1478 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

8. Проверяется сходимость энергетического баланса установки:

$$q_0 + l_{внутр} = q_k$$

$$1090 + 388 = 1478$$

9. Рассчитывается объемная производительность компрессора:

$$V_0 = G_{pa} \cdot g_1 = 0,016 \cdot 0,78 = 0,0125 \frac{M^3}{c}$$

10. Находится полная тепловая нагрузка конденсатора:

$$Q_k = G_{pa} \cdot q_k = 0,016 \cdot 1478 = 23,7 кВт$$

11. Удельная работа компрессора:

$$l_k = \frac{l_{внутр}}{\eta_{эм}} = \frac{388}{0,90} = 432 \frac{кДж}{кг}$$

12. Удельный расход электрической энергии на единицу вырабатываемого холода:

$$\mathcal{E}_x = \frac{l_k}{q_0} = \frac{432}{1090} = 0,396$$

13. Определяется электрическая мощность компрессора:

$$N_{\mathcal{E}} = G_{pa} \cdot l_k = 0,016 \cdot 432 = 6,92 кВт$$

14. Холодильный коэффициент установки:

$$\varepsilon = \frac{1}{\mathcal{E}_x} = \frac{1}{0,369} = 2,53$$

15. Рассчитывается коэффициент работоспособности холода:

$$(\tau_q)_n = 1 - \frac{T_{окр.среды}}{T_{н.сп}}$$

$$T_{н.сп} = \frac{T_{н1} - T_{н2}}{\ln \frac{T_{н1}}{T_{н2}}} = \frac{258 - 251}{\ln \frac{258}{251}} = 254,5 K$$

$$(\tau_q)_n = 1 - \frac{293}{254,5} = -0,151$$

16. КПД установки с учётом потерь энергии в испарителе (КПД по хладоносителю):

$$\eta_e' = \frac{q_0 \cdot |(\tau_q)_n|}{l_k} = \frac{1090 \cdot |-0,151|}{432} = 0,387 (\approx 39\%)$$

17. КПД установки без учета потерь энергии в испарителе (КПД по хладагенту):

$$\eta_e'' = \frac{q_0 \cdot |(\tau_q)_0|}{l_k}$$

$$(\tau_q)_0 = 1 - \frac{T_{окр.среды}}{T_0} = 1 - \frac{293}{248} = -0,182$$

$$\eta_e'' = \frac{q_0 \cdot |(\tau_q)_0|}{l_k} = \frac{1090 \cdot |-0,182|}{432} = 0,46 (\approx 46\%)$$

Установка с регенеративным теплообменником, представленная на рис. 2, рассчитывается аналогичным образом. По результатам расчетов проводится анализ и делается вывод о термодинамической эффективности применения той или иной холодильной установки.

*Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
Магистерская программа «Энергообеспечение предприятий.
Тепломассообменные процессы и установки»
Методическое обеспечение РПД Б1.В.ДВ.01.01 «Исследование режимов
работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске**

**Методические рекомендации
к самостоятельной работе студентов
по дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров
трансформаторов тепла»**

Смоленск

1. Общие сведения о самостоятельной работе студентов по дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла»

Цель самостоятельной работы – осмысленно и самостоятельно работать с учебным материалом, полученным при контактной работе с преподавателем, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свою профессиональную квалификацию.

Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла» выполняется в соответствии с рабочей программой дисциплины.

2. Содержание самостоятельной работы студентов по дисциплине

Процесс освоения студентами дисциплины «Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла» включает изучение 8 тем. В самостоятельную работу по всем темам входит:

- подготовка к лекциям;
- по темам №1, 5 и 6 подготовка к выполнению и защите работ;
- выполнение расчетно-графической работы;
- подготовка к сдаче экзамена.

2.1. Подготовка к лекциям и практическим занятиям

При подготовке к лекциям и практическим занятиям по теме №1 «Парожидкостные компрессионные трансформаторы тепла» студенты самостоятельно предварительно определяют, что такое трансформатор тепла, теплоотдатчик, теплоприемник, рабочий агент и выявляют температурные уровни работы рассматриваемых систем; что такое парожидкостной трансформатор тепла и в чем его отличие от других видов установок.

При подготовке к лекциям по теме №2 «Сорбционные трансформаторы тепла» самостоятельно выясняются условия использования данных трансформаторов; какие виды рабочих веществ могут быть использованы в этих установках и какими термодинамическими свойствами они должны обладать.

При подготовке к лекциям по темам №3 «Струйные трансформаторы тепла» и №4 «Вихревые трансформаторы тепла» студенты самостоятельно изучают особенности этих установок, их отличие от парожидкостных, а также уделяют внимание изучению вопросов, связанных с работой отдельных элементов (струйного компрессора, эжектора, вихревой трубы).

При подготовке к лекциям и занятиям по темам №5 «Одноступенчатые газовые трансформаторы тепла» и №6 «Многоступенчатые газовые трансформаторы» сту-

денты самостоятельно предварительно изучают свойства рабочих агентов этих холодильных установок, термодинамические особенности обратного цикла Карно и Джоуля, назначение и принцип работы детандерных установок.

При подготовке к лекциям теме №7 «Трансформаторы тепла, работающие по квазициклу» студенты самостоятельно изучают понятие квазицикла, вакуумного квазицикла и особенностей его осуществления в реальных условиях.

При подготовке к лекциям по теме №8 «Криогенные установки» студенты самостоятельно изучают понятие криогенной системы, где и для чего данные системы используются, в чем их отличия от других трансформаторов тепла, особенности рабочих агентов криогенных систем.

Контрольные вопросы для самопроверки

Тема №1 «Парожидкостные компрессионные трансформаторы тепла»

1. Что такое парожидкостной трансформатор тепла?
2. Что такое теплоотдатчик, теплоприемник, рабочий агент и хладоноситель в парожидкостных трансформаторах тепла?
3. Как трансформаторы тепла делятся в зависимости от температурных уровней теплоотдатчика, теплоприемника и окружающей среды?
4. Где находят применение парожидкостные трансформаторы тепла?

Тема №2 «Сорбционные трансформаторы тепла»

1. Что такое сорбционные трансформаторы тепла?
2. В чем отличие абсорбционных и адсорбционных трансформаторов тепла?
3. Какие вещества применяются в схемах сорбционных установок? Их особенности.
4. Где находят применение сорбционные трансформаторы тепла?

Тема №3 «Струйные трансформаторы тепла»

1. Какие бывают типы струйных трансформаторов тепла?
2. В чем отличие струйных трансформаторов тепла от других холодильных установок?
3. Какие вещества применяются в схемах струйных трансформаторов тепла?
4. Что такое струйный компрессор? В чем его отличие от других типов компрессоров?
5. Где находят применение струйные трансформаторы тепла?

Тема №4 «Вихревые трансформаторы тепла»

1. Какие бывают типы вихревых трансформаторов тепла?
2. В чем отличие вихревых трансформаторов тепла от струйных?

3. Что такое вихревая труба? Где находят применение вихревые трансформаторы тепла?

Тема №5 «Одноступенчатые газовые трансформаторы тепла»

1. По каким циклам может быть организована работа одноступенчатых газовых трансформаторов тепла?
2. В чем отличие газовых трансформаторов тепла от парожидкостных установок?
3. Какие рабочие агенты применяются в схемах одноступенчатых газовых трансформаторов тепла?
4. Что такое детандер? В чем его отличие от других типов расширительных машин?
5. Где находят применение одноступенчатые газовые трансформаторы тепла?

Тема №6 «Многоступенчатые газовые трансформаторы тепла»

1. По каким циклам может быть организована работа многоступенчатых газовых трансформаторов тепла?
2. В чем отличие многоступенчатых газовых трансформаторов тепла от одноступенчатых?
3. Какие рабочие агенты применяются в схемах многоступенчатых газовых трансформаторов тепла?
4. Где находят применение многоступенчатые холодильные установки?

Тема №7 «Трансформаторы тепла, работающие по квазициклу»

1. Что такое квазицикл?
2. Где находят применение трансформаторы тепла, работающие по вакуумному квазициклу?

Тема №8 «Криогенные установки»

1. Что такое криогенный трансформатор тепла?
2. Как криогенные установки делятся в зависимости от температурных уровней теплоотдатчика, теплоприемника и окружающей среды?
3. Какие вещества применяются в качестве рабочих агентов в схемах криогенных установок? Их особенности.
4. Где находят применение криогенные трансформаторы тепла?

Список рекомендуемой литературы представлен в рабочей программе дисциплины.

2.2. Подготовка к сдаче экзамена

Для подготовки к сдаче экзамена по дисциплине ««Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла» в рабочей программе дисциплины приведен перечень экзаменационных вопросов и список рекомендуемой литературы.

3. Методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

По дисциплине ««Исследование режимов работы и оптимизация параметров трансформаторов тепла» разработаны:

- методические рекомендации к лекционным занятиям, в которых представлена тематика и содержание лекций;
- методические рекомендации к выполнению работ с указанием: целей, заданий и методических указаний к выполнению работ, порядка проведения работ, требований к оформлению отчета, контрольных вопросов для защиты работ и исходные данные;
- методические рекомендации к выполнению расчетно-графической работы с указанием цели и задания, порядка выполнения расчетно-графической работы, требований к оформлению отчета и исходные данные для проведения расчетов;
- методические рекомендации к самостоятельной работе студентов.