


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Факультет Мореходный
(наименование факультета, к которому относится кафедра)

Кафедра Технологические машины и оборудование
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Декан мореходного факультета

Труднев С.Ю.
«01» декабря 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Криогенные системы»

направление подготовки 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения»

направленность (профиль) «Холодильная техника и технологии»

Петропавловск-Камчатский,
2021 г.

Рабочая программа составлена на основании ФГОС ВО по направлению подготовки 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Составитель рабочей программы

Доцент кафедры ТМО


_____ (подпись)

Сарайкина И.П.

Рабочая программа рассмотрена на заседании кафедры «Технологические машины и оборудование» «23» ноября 2021 г. протокол № 3.

Заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», к.т.н., доцент

«23» ноября 2021 г.



А. В. Костенко

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Дисциплина «Криогенные системы» является одной из основных дисциплин программы подготовки бакалавров по направлению 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Цель преподавания дисциплины:

- сформировать и конкретизировать знания по основополагающим принципам получения низких температур;
- подготовить специалистов к самостоятельному термодинамическому анализу и расчету рабочих процессов в низкотемпературных системах, а также к выбору рациональных методов достижения поставленных задач в области получения и использования низких температур.

Задачей курса является формирование навыков и умения по следующим направлениям деятельности:

- применение принципов термодинамики для расчета и анализа низкотемпературных процессов;
- определение параметров и свойств рабочих тел холодильных машин и криогенных систем с использованием термодинамических таблиц и диаграмм;
- расчет параметров рабочего тела в процессах, сопровождающихся понижением температуры;
- определение характеристик и потерь при осуществлении процессов получения криогенных температур;
- анализ процессов охлаждения с целью выбора оптимального способа получения необходимого уровня низких температур;

2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Криогенные системы» направлен на формирование *общепрофессиональной компетенции* (ОПК-3) категории «Теоретические и практические основы профессиональной деятельности» программы бакалавриата.

Перечень планируемых результатов обучения при изучении дисциплины приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Планируемые результаты обучения при изучении дисциплины, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код компетенции	Планируемые результаты освоения образовательной программы	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции	Планируемый результат обучения по дисциплине	Код показателя освоения
ОПК-3	Способен самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	ИД-1 _{опк-3} : Знает методы самостоятельного освоения современной физической, аналитической и технологической аппаратуры различного назначения	<i>Знать:</i> - методы самостоятельного освоения современной физической, аналитической и технологической аппаратуры криогенных систем.	З(ОПК-3)1
		ИД-2 _{опк-3} : Умеет самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	<i>Уметь:</i> - самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру криогенных систем.	У(ОПК-3)1

		ИД-3 _{ОПК-3} : Владеет навыками работы на современной физической, аналитической и технологической аппаратуре различного назначения	<i>Владеть:</i> - навыками работы на современной физической аналитической и технологической аппаратуре криогенных систем	В(ОПК-3)1
--	--	---	---	-----------

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Криогенные системы» - обязательная дисциплина в структуре образовательной программы.

Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин «Высшая математика», «Физика», «Химия», «Термодинамика и тепломассообмен».

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины, используются при изучении профильных дисциплин учебного плана: «Тепломассообменные аппараты низкотемпературных установок», «Автоматизация низкотемпературных установок», «Монтаж, эксплуатация и ремонт низкотемпературных установок» и при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В соответствии с учебным планом подготовки бакалавров по направлению 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» преподавание дисциплины реализуется в 6 семестре обучения.

Тематический план дисциплины по очной форме обучения представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Тематический план дисциплины по очной форме обучения

Наименование разделов и тем	Всего часов	Аудиторные занятия	Контактная работа по видам учебных занятий			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля	Итоговый контроль знаний по дисциплине
			Лекции	Семинары (практические занятия)	Лабораторные работы			
Раздел 1. Основные понятия и законы. Свойства криоагентов	26	16	8	8		10	О	
Тема 1. Введение.	2	2	2				Кл Рф	
Тема 2. Основные понятия и законы	4	4	4				ПЗ Кл	
Тема 3. Свойства рабочих тел криогенных систем	20	10	2	8		10	ПЗ Кл Рф	
Раздел 2. Способы получения низких температур	50	30	12	18		20	О	
Тема 4. Термомеханические способы охлаждения	19	14	6	8		5	ПЗ Кл	

Тема 5. Процессы охлаждения с использованием рабочего тела в твердом состоянии	13	8	4	6		5	Кл Рф	
Тема 6. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств изотопов гелия	16	6	2	4		10	Кл Рф	
Раздел 3. Циклы криогенных установок	56	26	8	18		30	О	
Тема 7. Классификация криогенных установок. Идеальные циклы криостатирования и ожижения	14	4	2	2		10	О Кл	
Тема 8. Ступени охлаждения и циклы криогенных установок	30	20	6	14		10	ПЗ РГР Кл	
Тема 9. Циклы криогенных газовых машин	12	2		2		10	Кл Рф	
Раздел 4. Низкотемпературное разделение газовых смесей	44	14	6	8		30	О	
Тема 10. Свойства и диаграммы газовых смесей.	14	4	2	2		10	ПЗ РГР Кл	
Тема 11. Низкотемпературная ректификация	30	10	4	6		20	ПЗ РГР Кл	
Экзамен	36							36
Всего	216	85	34	51		95		36

Примечание: О – опрос; ПЗ – практические задания; Кл – коллоквиум; РГР – расчетно-графическая работа (контрольная работа для студентов ЗФО); РФ – реферат (доклад)

Раздел 1. Основные понятия и законы. Свойства криоагентов

Тема 1. Введение

Лекция. Введение. Криология, ее промышленное и научное значение.

Рассматриваемые вопросы. Сферы приложения криогеники, ее важное промышленное и научное значение. История развития криогеники.

Тема 2. Основные понятия и законы

Лекция. Основные понятия и законы. Термодинамическая (абсолютная) температура.

Рассматриваемые вопросы. Контрольная система. Принцип сохранения массы и энергии. Материальный баланс контрольной системы для однородных и неоднородных по составу потоков массы. Первое и второе начало термодинамики применительно к рабочим телам и процессам физики низких температур. Энергетический баланс. Абсолютная термодинамическая шкала температур. Взаимосвязь энтропии и температуры. Принцип недостижимости абсолютного нуля термодинамической температуры.

Лекция. Определение термодинамического состояния рабочих тел низкотемпературных систем. Уравнения состояния. Термодинамические диаграммы криоагентов.

Рассматриваемые вопросы. Термическое и калорическое уравнения состояния. Уравнения состояния идеального газа. Уравнения Ван-дер-Ваальса состояния реального газа. Равновесные состояния и фазовые переходы чистых веществ. Диаграммы $p-V$ и $p-T$ чистых веществ. Тройная и критическая точки.

Тема 3. Свойства рабочих тел криогенных систем

Лекция. Основные свойства рабочих тел криогенных систем.

Рассматриваемые вопросы. Температуры и давления кипения, плавления, критической и тройной точек. Плотность льда, насыщенной жидкости и насыщенного пара. Теплота испарения и плавления. Удельная теплоемкость насыщенной жидкости и насыщенного пара.

Практическое занятие. Изучение свойств воздуха и продуктов его разделения.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Состав сухого воздуха у поверхности Земли. Термодинамические, теплофизические и эксплуатационные свойства азота, кислорода, аргона, криптона и ксенона.

Практическое занятие. Изучение свойств водорода.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Свойства изотопов водорода. Способы получения водорода. Орто-паросостав и орто-пароконверсия водорода.

Практическое занятие. Изучение свойств гелия.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Изотопы ^4He и ^3He . Зависимость теплоемкости газообразного и жидкого ^4He от температуры. p - T диаграмма ^4He и ^3He . Сверхтекучее состояние HeII , λ -переход из области состояния HeI в HeII . Свойства раствора ^3He в ^4He .

Практическое занятие. Коллоквиум.

Семинар. Устный опрос с целью выяснения уровня знаний студентов группы по материалу 2 раздела. Заслушивание и обсуждение докладов.

Контрольные вопросы:

- 1) Какую температурную область охватывает криогенная техника?
- 2) Как формулируется уравнение материального баланса?
- 3) Как формулируется уравнение энергетического баланса закрытой термомеханической системы?
- 4) Как формулируется уравнение энергетического баланса открытой термомеханической системы?
- 5) Что такое принцип возрастания энтропии?
- 6) Как формулируется третье начало термодинамики?
- 7) Какое значение имеют критическая температура и критическое давление?
- 8) Где и почему в T - s диаграмме линии изохор имеют точку перелома?
- 9) Как располагаются в диаграмме T - s в области влажного насыщенного пара линии изобар и изотерм и почему?
- 10) Какая из линий, исходящих на диаграмме T - s из одной точки, располагается круче: изобара или изохора – и почему?
- 11) Всегда ли в T - s диаграмме изобары однофазных состояний являются восходящими кривыми и почему?
- 12) Какие изотопы водорода вы знаете?
- 13) В чем отличие параводорода от ортоводорода?
- 14) Каков состав нормального водорода?
- 15) Что такое конверсия водорода?
- 16) Что происходит при длительном хранении жидкого нормального водорода?
- 17) Какие изотопы гелия вы знаете?
- 18) Что такое λ -переход и при каких условиях он происходит?
- 19) Объясните суть явления сверхтекучести жидкого гелия.
- 20) Правило фаз Гиббса. Привести примеры для чистого вещества и бинарной смеси веществ.
- 21) Что является низкокипящим и высококипящим компонентом в смеси кислород-азот?
- 22) Что такое азеотропная бинарная смесь?
- 23) От чего зависит величина минимальной теоретической работы разделения газовой смеси? Почему действительная работа разделения газовой смеси, даже в наиболее совершенных установках, значительно превышает теоретическую?
- 24) Что такое относительная летучесть? От чего зависит относительная летучесть идеальной и реальной бинарных систем?

25) В чем состоят преимущества и недостатки процессов фракционного испарения и конденсации при использовании их для разделения воздуха?

Раздел 2. Способы получения низких температур

Тема 4. Термомеханические способы охлаждения

Лекция. Физические основы получения низких температур. Общий принцип охлаждения. Изоэнтальпное расширение.

Рассматриваемые вопросы. Классификация способов охлаждения. Внешнее и внутреннее охлаждение. Понятие о холодопроизводящем процессе. Качественный анализ процесса изоэнтальпного расширения. Количественная оценка изменения температуры в процессе изоэнтальпного расширения. Адиабатное расширение с совершением внешней работы в детандере. процесс выхлопа (свободного выпуска из сосуда).

Практическое занятие. Адиабатное расширение газа с совершением внешней работы в объемных и лопаточных машинах.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Схема и принцип работы криогенного поршневого детандера. Теоретическая индикаторная диаграмма поршневого детандера. Схема и принцип действия турбодетандера. Определение термодинамических параметров и построение процесса изоэнтальпного расширения в $T-s$ диаграммах криоагентов.

Лекция. Дросселирование (изоэнтальпное расширение).

Рассматриваемые вопросы. Процесс дросселирования. Изменение температуры в процессе адиабатного дросселирования. Дифференциальный дроссель-эффект (коэффициент Джоуля-Томсона). Точки инверсии, кривая инверсии.

Практическое занятие. Изучение эффекта Джоуля-Томсона. Сопоставление изоэнтальпного и изоэнтальпного расширений как способа охлаждения.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Установка Джоуля-Томсона для исследования дросселирования газов и ее расчетная схема. Определение изменения температуры при дросселировании реального газа. Построение в термодинамических диаграммах и анализ процессов изоэнтальпного расширения и дросселирования в однофазной и двухфазной областях.

Лекция. Охлаждение с помощью адиабатной откачки паров кипящего криоагента.

Рассматриваемые вопросы. Достоинства криостатирования объектов с помощью криогенных жидкостей. $p-T$ диаграмма чистого однородного вещества, тройная точка. Состояние равновесия между жидкостью и паром. Количественная оценка процесса. Диапазоны температур, получаемых с помощью криожидкостей.

Практическое занятие. Расчет процесса охлаждения с помощью откачки паров жидкого криоагента.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Построение зависимости температуры насыщения от давления для различных веществ. Определение количества жидкости, удаляемой в виде пара для получения необходимой разницы температур.

Практическое занятие. Коллоквиум.

Семинар. Устный опрос по теме «Термомеханические способы получения низких температур».

Контрольные вопросы:

- 1) Кратко опишите основные методы внешнего и внутреннего охлаждения.
- 2) Как определяется работа компрессора при изотермическом и изоэнтальпном сжатии?
- 3) Как определяется теплота, отводимая от рабочего вещества при изотермическом сжатии?
- 4) Как определяется теплота, отводимая от рабочего вещества после изоэнтальпного сжатия?
- 5) Какие процессы для получения низких температур являются холодопроизводящими, а какие – нехолодопроизводящими?

- 6) Объясните, почему дросселирование для идеального газа является полностью необратимым процессом, а для реального газа этот процесс частично обратим?
- 7) Почему можно допустить, что процесс дросселирования протекает адиабатно? Для чего вводится это допущение?
- 8) Почему процесс дросселирования изображается в диаграмме штриховой линией?
- 9) Дайте определение дифференциального эффекта Джоуля-Томсона, его физическая сущность.
- 10) Всегда ли температура рабочего тела при дросселировании снижается? Поясните примерами.
- 11) Что такое кривая инверсии и как она располагается в T-s диаграмме?
- 12) Что означают понятия «точка инверсии» и «кривая инверсии»?
- 13) Покажите процесс дросселирования и кривую состояния инверсии в диаграмме s-T.
- 14) Дайте определение дифференциального эффекта детандирования. В чем заключается его физическая сущность?
- 15) Как изменяется дифференциальный эффект детандирования при изменении температуры, давления?
- 16) В чем заключается трудность ожижения газа путем использования одного адиабатного расширения?
- 17) Какой из процессов более эффективный: изоэнтروпийное расширение или выхлоп?

Тема 5. Процессы охлаждения с использованием рабочих тел в твердом состоянии

Лекция. Магнитокалорический способ получения криогенных температур.

Рассматриваемые вопросы. Принцип адиабатного размагничивания. Поведение вещества в магнитном поле. Диамагнетика и парамагнетика. Взаимосвязь энтропии парамагнетика с его температурой и напряженностью магнитного поля. Термодинамика процесса.

Практическое занятие. Использование адиабатного размагничивания для получения температур ниже одного кельвина. Магнитный термометр.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. T-s диаграмма парамагнитной соли. Характеристики парамагнитных солей. Процесс адиабатного размагничивания парамагнитной соли. Принципиальная схема измерения магнитной восприимчивости. Принцип работы магнитного термометра

Практическое занятие. Магнитные криогенные машины.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Принципиальная схема цикл в T-s диаграмме магнитной криогенной машины. Зависимость магнитокалорического эффекта различных материалов от температуры. Конструктивная схема и принцип работы поршневой магнитной криогенной машины.

Лекция. Десорбционное охлаждение

Рассматриваемые вопросы. Процесс физической адсорбции. Схема аппарата для десорбционного охлаждения.

Практическое занятие. Непрерывно действующий десорбционный охладитель.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Конструктивная схема и принцип работы десорбционного регенеративного охладителя.

Тема 6. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств изотопов гелия

Лекция. Способ охлаждения основанный на тепловом эффекте растворения изотопа He^3 в He^4 . Охлаждение адиабатной кристаллизацией.

Рассматриваемые вопросы. Свойства жидких растворов $\text{He}^3 - \text{He}^4$. Фазовая диаграмма смеси He^3 и He^4 . Охлаждение при растворении He^3 в He^4 . Процесс охлаждения по методу Померанчука в фазовой и энтропийной диаграммах. Особенности протекания процесса и трудности практического воплощения.

Практическое занятие. Рефрижератор растворения.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Принципиальная схема рефрижератора растворения. Холодопроизводительность и предельная температура, получаемые в рефрижераторе.

Практическое занятие. Коллоквиум. Сравнительный термодинамический и экономический анализ процессов получения криогенных температур.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Устный опрос с целью выяснения уровня знаний студентов группы по материалу тем: «Процессы охлаждения с использованием рабочего тела в твердом состоянии», «Процессы охлаждения, основанные на свойствах изотопов гелия». Заслушивание докладов по материалам рефератов. Рассмотрение процессов получения низких температур с точки зрения термодинамической и энергетической эффективности. Области использования.

Контрольные вопросы:

- 1) Приведите цикл работы магнитной криогенной машины в T-s диаграмме парамагнитной соли.
- 2) Выведите формулу для магнитокалорического коэффициента.
- 3) Приведите цикл в T-s диаграмме магнитной криогенной машины.
- 4) Приведите конструктивную схему десорбционного регенеративного охладителя.
- 5) Приведите принципиальную схему рефрижератора растворения.
- 1) В чем состоит общий принцип охлаждения с использованием рабочих тел в твердом состоянии.
- 2) В каких случаях следует применять адиабатное размагничивание?
- 3) В чем состоит принцип охлаждения путем адиабатного размагничивания парамагнитных солей?
- 4) В чем состоит принцип работы магнитной криогенной машины.
- 5) В чем состоит принцип десорбционного охлаждения.
- 6) В чем заключается явление сверхпроводимости.
- 7) В чем состоит особенность протекания процесса охлаждения по методу Померанчука и трудности его практического воплощения.
- 8) Объясните на чем заключается способ охлаждения, основанный на тепловом эффекте растворения изотопа He³ в He⁴.
- 9) Каковы холодопроизводительность и предельная температура, получаемые в рефрижераторе растворения?
- 10) Какие термометры применяются для измерения температуры ниже 1 К.

Раздел 3. Циклы криогенных установок

Тема 7. Классификация криогенных установок. Идеальные циклы криостатирования и ожижения

Лекция. Введение. Идеальные циклы и процессы криогенных систем.

Рассматриваемые вопросы. Классификация криогенных установок по назначению, по способу получения холода. Обратимый цикл криогенного криостатирования (цикл Карно). Идеальный цикл ожижения газа. Полная и полезная холодопроизводительность. Минимальная работа цикла.

Практическое занятие. Характеристики идеальных циклов криогенных систем.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Расчет обратимых идеальных циклов для получения и поддержания криогенных температур и ожижения криоагентов.

Контрольные вопросы

- 1) Чем отличается схема идеального цикла термостатирования от схемы обратимого цикла для охлаждения газов?
- 2) Каким образом осуществить обратимый цикл ожижения газов?

- 3) Почему расход энергии на ожижение газов в обратном цикле Карно больше, чем в идеальном цикле ожижения?
- 4) В чем отличие полной и полезной холодопроизводительности криогенного цикла?

Тема 8. Ступени охлаждения и циклы криогенных установок

Лекция. Характеристики циклов криогенных установок. Ступени охлаждения криогенных циклов.

Рассматриваемые вопросы. Основные характеристики криогенных циклов: холодопроизводительность, затраты работы, потери, и эффективность реальных циклов. Ступени с внешним охлаждением, с расширением потока в детандере, с расширением потока в дроссельном устройстве ожижительных и рефрижераторных циклов.

Практическое занятие. Энергетический баланс отдельных ступеней охлаждения криогенных циклов.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Составление энергетического баланса и определение удельной холодопроизводительности ступеней с внешним охлаждением, с расширением потока в детандере, с расширением потока в дроссельном устройстве ожижительных и рефрижераторных циклов.

Контрольные вопросы

- 1) В чем заключается регенеративный принцип, используемый в криогенных циклах?
- 2) Что представляет собой изотермический эффект дросселирования и как его можно увеличить в криогенном дроссельном цикле?
- 3) Какой эффект можно получить путем включения ступени с внешним охлаждением в дроссельные циклы?
- 4) Как влияет изменение температуры кипения жидкого азота, используемого в ступени предварительного охлаждения, на коэффициент ожижения водорода или гелия в дроссельном цикле?
- 5) Как влияет величина давления прямого потока на структуру ступени с адиабатным расширением части потока в детандере?
- 6) Почему процесс дросселирования не используется в высокотемпературных ступенях охлаждения многоступенчатых криогенных циклов.
- 7) Почему дроссельная ступень охлаждения используется в качестве последней ступени в ожижительных криогенных циклах?

Лекция. Криогенные циклы с дросселированием.

Рассматриваемые вопросы. Цикл с простым дросселированием. Цикл с предварительным охлаждением и дросселированием. Циклы с несколькими ступенями предварительного охлаждения. Цикл с двойным дросселированием и циркуляцией части потока.

Практическое занятие. Структура криогенных циклов. Выбор исходных данных для расчета.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Целесообразное число ступеней охлаждения. Определение температурных уровней после каждой ступени охлаждения и давления прямого и обратного потоков. Выбор допускаемых потерь и коэффициентов. Связь криогенных циклов с объектами охлаждения.

Контрольные вопросы

- 1) Каким образом определяется минимальное число ступеней охлаждения в криогенных циклах?
- 2) Как определяется температурный уровень включения ступеней охлаждения в криогенных циклах?
- 3) Какое различие имеется в подходе к определению температурного уровня включения ступеней охлаждения в рефрижераторном цикле?

- 4) Какое значение разности температур между потоком на теплом конце теплообменника принимают для расчета потерь холодопроизводительности от недорекуперации?
- 5) От чего зависит выбор величины теплопритока из окружающей среды через изоляционную конструкцию?
- 6) Как влияет увеличение разности температур на теплом конце теплообменника конечной дроссельной ступени на коэффициент ожижения водородного ожижителя и в каких пределах эта разность выбирается?
- 7) Что такое адиабатный КПД детандера? От чего зависит величина адиабатного КПД детандера?

Практическое занятие. Основные характеристики ожижительных и рефрижераторных криогенных циклов с дросселированием.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Определение удельной холодопроизводительности, удельной затраты работы, коэффициента ожижения, холодильного коэффициента и термодинамического КПД криогенных циклов с дросселированием в теоретическом и действительном вариантах.

Контрольные вопросы

- 1) Как определяются основные характеристики цикла с простым дросселированием?
- 2) На какие цели расходуется холодопроизводительность в цикле с простым дросселированием?
- 3) Чем определяется максимальное количество сжиженного газа в цикле с простым дросселированием?
- 4) Какими факторами объясняется увеличение удельного расхода энергии в действительном цикле по сравнению с теоретическим?
- 5) В каком из дроссельных циклов при ожижении воздуха наименьший удельный расход энергии и в каком из них можно добиться наибольшего выхода сжиженного газа?

Практическое занятие. Основные характеристики ожижительных и рефрижераторных криогенных циклов с предварительным охлаждением и дросселированием.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Определение удельной холодопроизводительности, удельной затраты работы, холодильного коэффициента и термодинамического КПД криогенных циклов с предварительным охлаждением и дросселированием.

Контрольные вопросы

- 1) Почему нельзя осуществить ожижение водорода и гелия по простому дроссельному циклу без предварительного охлаждения?
- 2) На что расходуется холодопроизводительность ступени предварительного охлаждения?
- 3) Чему равна величина давления газа после компрессора в дроссельном цикле с внешним источником предварительного охлаждения, применяемом для ожижения водорода (гелия)? Чем обуславливается выбор этой величины?
- 4) Почему рабочее давление гелиевых ожижителей, работающих по дроссельному циклу с внешними источниками предварительного охлаждения, принимается на 30–35 % ниже инверсионного давления?

Лекция. Детандерные криогенные циклы. Комбинированные циклы с дросселированием и расширением криоагента в детандерах.

Рассматриваемые вопросы. Газовые детандерные циклы с одной и двумя ступенями охлаждения. Определение оптимального перепада давления в детандере. Сравнительные характеристики газовых циклов. Термодинамический анализ детандерного цикла. Ожижительные и рефрижераторные циклы высокого и среднего давления с двумя ступенями охлаждения. Определение доли детандерного потока. Термодинамический расчет цикла. Цикл низкого давления с турбодетандером. Цикл с расширением в детандере, дросселированием и предварительным охлаждением. Циклы с расширением потока в нескольких детандерах и дросселированием. Цикл с парожидкостным детандером.

Практическое занятие. Расчет комбинированных ожижительных и рефрижераторных циклов высокого и среднего давления с расширением в детандере и дросселированием.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Определение удельной холодопроизводительности, удельной затраты работы, коэффициента ожижения, холодильного коэффициента и термодинамического КПД комбинированных криогенных циклов.

Контрольные вопросы

- 1) Как определяется доля воздуха, расширяющегося в детандере в циклах Клода и Гейландта?
- 2) Как найти температуру газа перед детандером с помощью i - s -диаграммы, чтобы в конце процесса расширения получить сухой насыщенный пар?
- 3) Как определяется температура рабочего тела цикла на выходе из детандера?
- 4) Чему равно давление прямого потока в комбинированных циклах высокого и среднего давления с детандерной и дроссельной ступенями охлаждения?
- 5) Чем отличается ступень предварительного охлаждения цикла Гейляндта от цикла Клода.

Практическое занятие. Основные характеристики цикла низкого давления с турбодетандером.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Определение удельной холодопроизводительности, удельной затраты работы, холодильного коэффициента и термодинамического КПД цикла низкого давления.

Контрольные вопросы

- 1) В чем заключаются особенности установки ожижения воздуха, работающей по циклу низкого давления Капицы?
- 2) Из каких элементов состоит принципиальная схема криогенной установки, работающей по циклу низкого давления?
- 3) За счет чего повышается эффективность расширения газа в детандере в установке, работающей по циклу Капицы.

Основные понятия темы: Ступени охлаждения криогенных циклов и их энергетический баланс. Основные характеристики рефрижераторных и ожижительных циклов. Структура криогенных циклов и показатели эффективности. Криогенные циклы: с дросселированием, предварительным охлаждением, детандерные, комбинированные.

Практическое занятие. Коллоквиум.

Семинар. Устный опрос с целью выяснения уровня знаний студентов группы по материалу раздела.

Контрольные вопросы:

- 1) По каким признакам классифицируются криогенные циклы?
- 2) Что характеризует коэффициент ожижения?
- 3) Как определяются затраты работы в криогенной системе?
- 4) Что характеризует термодинамический КПД и как он определяется?
- 5) Как определяется холодильный коэффициент криогенного цикла?
- 6) В чем состоит принцип составления энергетического баланса ступени охлаждения?
- 7) Что представляет собой ступень охлаждения криогенного цикла?
- 8) Изобразите схему ступени с внешним охлаждением и её процессы в T - s координатах.
- 9) Основные характеристики ступени с внешним охлаждением криогенного цикла.
- 10) Изобразите схему ступени с расширением части потока в детандере и её процессы в T - s координатах.
- 11) Основные характеристики ступени с расширением потока в детандере.
- 12) Изобразите схему ступени с расширением потока в дроссельном устройстве и её процессы в T - s координатах.
- 13) Основные характеристики ступени с расширением потока в дроссельном устройстве.
- 14) Изобразите схему цикла с простым дросселированием и его процессы в T - s координатах.

- 15) Основные характеристики цикла с простым дросселированием.
- 16) Изобразите схему цикла с предварительным охлаждением и дросселированием, его процессы в T-s координатах.
- 17) Основные характеристики цикла с предварительным охлаждением и дросселированием.
- 18) Изобразите схему цикла Клода и его процессы в T-s координатах.
- 19) Основные характеристики цикла Клода
- 20) Изобразите схему цикла Гейляндта и его процессы в T-s координатах.
- 21) Основные характеристики цикла Гейляндта.
- 22) Изобразите схему цикла Капицы и его процессы в T-s координатах.
- 23) Основные характеристики цикла Капицы?
- 24) Изобразите схему цикла с расширением в детандере, дросселированием и предварительным охлаждением и его процессы в T-s координатах.
- 25) Основные характеристики цикла с расширением в детандере, дросселированием и предварительным охлаждением?

Тема 9. Циклы криогенных газовых машин

Практическое занятие. Коллоквиум.

Семинар. Подготовка докладов по материалам рефератов. Устный опрос с целью выяснения уровня знаний студентов группы по материалу раздела.

Контрольные вопросы

- 1) Что общего в принципе действия криогенных газовых машин.
- 2) В чем основные трудности рассмотрения и расчета процессов криогенных газовых машин?
- 3) Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Стирлинга? Привести последовательность процессов в обратном цикле Стирлинга.
- 4) В чем заключается принцип работы криогенной газовой машины Стирлинга.
- 5) Какие основные элементы должны входить в установку, работающую по обратному циклу Стирлинга?
- 6) В чем заключается принцип работы регенератора?
- 7) Как работает криогенная газовая машина Гиффорда-Макмагона? Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Гиффорда-Макмагона?
- 8) Привести цикл работы криогенной газовой машины Гиффорда-Макмагона.
- 9) Какие основные элементы должны входить в установку, работающую по обратному циклу Гиффорда-Макмагона?
- 10) В чем заключается принцип работы пульсационного криогенератора.
- 11) Какие потери холодопроизводительности имеются в криогенных газовых машинах?
- 12) В чем состоит отличие и сходство криогенных газовых машин Стирлинга и Вюльье-Такониса?
- 13) Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Вюльье-Такониса?
- 14) В чем заключается принцип работы термокомпрессора?
- 15) Дать сравнительный анализ энергетической эффективности криогенных газовых машин?

Раздел 4. Низкотемпературное разделение газовых смесей

Тема 10. Свойства и диаграммы газовых смесей

Лекция. Бинарные и многокомпонентные газовые смеси.

Рассматриваемые вопросы. Методы выражения концентраций. Минимальная работа и действительный расход энергии на разделение газовой смеси на компоненты. Правило фаз Гиббса. Особенности поведения бинарных смесей в двухфазной области. Диаграммы бинарной смеси, построение процессов испарения и конденсации. Свойства тройных и многокомпонентных смесей.

Практическое занятие. Диаграммы равновесных состояний двухкомпонентных смесей

криоагентов. Диаграммы $y-x$ и $i-x$, y воздуха.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Построение термодинамических процессов и определение состава и термодинамического состояния двухкомпонентных смесей криоагентов с помощью равновесных диаграмм: $p-x$; $T-x$; $T-p-x-y$; $x-y$; $x-i$ и $T-p-i-x-y$. Определение изменения состава двухкомпонентной смеси и тепловых эффектов в результате протекания термодинамических процессов.

Тема 11. Низкотемпературная ректификация

Лекция. Низкотемпературная ректификация. Ректификационные колонны.

Рассматриваемые вопросы. Способы низкотемпературного разделения газовых смесей. Процессы простого и фракционированного испарения (конденсации) бинарных смесей. Ректификация. Изменение состава пара и жидкости по высоте ректификационной колонны. Понятие о теоретической ректификационной тарелке. Разделение воздуха в колоннах однократной и двукратной ректификации. Типы ректификационных колонн. Составление энергетических и материальных балансов ректификационных колонн и определение основных технологических потоков, а также нагрузки на конденсатор-испаритель. Графический расчет числа теоретических ректификационных тарелок по диаграммам $y-x$ и $i-x$, y . Определение числа действительных ректификационных тарелок.

Практическое занятие. Определение основных потоков массы и теплоты в ректификационной колонне воздухоразделительной установки.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Составление энергетических и материальных балансов ректификационных колонн ВРУ и определение основных технологических потоков, а также нагрузки на конденсатор-испаритель.

Практическое занятие. Расчет числа ректификационных тарелок колонны двукратного разделения воздуха.

Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п. Графический расчет числа теоретических ректификационных тарелок по диаграммам $y-x$ и $i-x$, y . Определение числа действительных ректификационных тарелок.

Лекция. Процессы низкотемпературного разделения газовых смесей и холодильные циклы установок разделения воздуха. Мембранный метод разделения воздуха и метод короткоциклового адсорбции.

Рассматриваемые вопросы. Технологические процессы разделения и очистки промышленных газов. Минимальная работа разделения газообразных и жидких смесей. Примеры. Сравнение l_{min} . Возможности осуществления в одной низкотемпературной установке нескольких элементарных технологических задач. Определение минимальной энергии как суммы значений l_{min} для отдельных процессов. Принцип мембранного разделения воздуха. Принцип работы и схема адсорбционной азотной установки.

Практическое занятие. Коллоквиум.

Семинар. Защита расчетно-графической работы «Расчет процесса ректификации воздуха».

Контрольные вопросы

- 1) Структура диаграммы $y-x$ воздуха
- 2) Структура диаграммы $i-x, y$ воздуха
- 3) Разделение воздуха методом ректификации. Понятие о теоретической ректификационной тарелке.
- 4) Принципиальная схема ректификационной колонны воздухоразделительной установки.
- 5) Типы ректификационных колонн.
- 6) Составление энергетического баланса ректификационной колонны.
- 7) Составление материального баланса ректификационной колонны.
- 8) Определение основных технологических потоков, а также нагрузки на конденсатор-испаритель ректификационной колонны.

- 9) Методы определения числа действительных ректификационных тарелок.
- 10) Графический расчет числа теоретических ректификационных тарелок по диаграмме $y-x$. Определение числа действительных ректификационных тарелок.
- 11) Графический расчет числа теоретических ректификационных тарелок по диаграммам $i-x, y$. Определение числа действительных ректификационных тарелок.

4. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Самостоятельная работа студентов (СРС) включает следующие виды работ:

- проработка (углубленное изучение) лекционного материала, работа с конспектами лекций;
- работа с основной и дополнительной литературой;
- подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к контрольной работе;
- чтение и проработка рекомендованной основной и дополнительной литературы;
- поиск и проработка материалов из Интернет-ресурсов, периодической печати;
- выполнение реферата;
- подготовка докладов по теме реферата;
- подготовка презентаций для иллюстрации докладов;
- подготовка к текущему (коллоквиум) и итоговому (промежуточной аттестации) контролю знаний по дисциплине (экзамен).

Выполнение и защита расчетно-графических работ (контрольные работы – для студентов заочной формы обучения)

- «Расчет цикла криогенной установки».
- «Расчет процесса ректификации воздуха»;

Самостоятельное изучение и выполнение рефератов по теме:

1. *Циклы криогенных газовых машин.*

Цикл криогенной газовой машины Стирлинга. Обратные циклы Стирлинга и Эриксона. Схема реализации цикла Стирлинга в поршневой машине с двумя поршнями регенератором и охладителем. Цикл Стирлинга в машинах с гармоничным движением поршней.

Цикл криогенной газовой машины Гиффорда-Мак-Магона. Принципиальная схема и цикл криогенератора Гиффорда – Мак-Магона. Индикаторная диаграмма криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона. Схема одно- и двухступенчатой машины Гиффорда-Мак-Магона с золотниковым газораспределителем.

Пульсационный криогенератор. Цикл Вюльмье-Такониса. Схемы и принцип работы пульсационной трубы. Схема действия криогенной газовой машины Вюльмье-Такониса с двумя вытеснителями и диаграммы рабочего процесса.

Основные понятия темы: Криогенная газовая машина. Обратные циклы и принципиальные схемы КГМ. КГМ Стирлинга. Цикл КГМ Гиффорда – Мак-Магона. Цикл и принципиальная схема Вюльмье-Такониса.

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ЭКЗАМЕН)

1. Области применения криогенной техники и ее особенности.
2. Контрольная система. Принцип сохранения массы и энергии. Первое начало термодинамики. Энергетический баланс.
3. Второе начало термодинамики. Понятие энтропии.
4. Термические и калорические уравнения состояния. Уравнения состояния идеального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса состояния реального газа.

5. Температурные шкалы в криогенике. Абсолютная термодинамическая шкала температур. Взаимосвязь энтропии и температуры. Принцип недостижимости абсолютного нуля термодинамической температуры.
6. Диаграммы p - V и p - T чистых веществ. Тройная и критическая точки. Правило фаз Гиббса. T - s диаграмма и определение термодинамических параметров криоагентов.
7. Бинарные и многокомпонентные смеси. Методы выражения концентраций. Правило фаз Гиббса. Особенности поведения бинарных смесей в двухфазной области. Диаграммы бинарной смеси, построение процессов испарения и конденсации.
8. Основные термодинамические, теплофизические и специфические свойства азота.
9. Основные термодинамические, теплофизические и специфические свойства кислорода.
10. Основные термодинамические, теплофизические и специфические свойства водорода. Изотопы водорода. Орто-паросостав и орто-пароконверсия водорода.
11. Основные термодинамические, теплофизические и специфические свойства изотопа гелия-4 и p - T диаграмма. Сверхтекучее состояние HeII, λ -переход из области состояния HeI в HeII.
12. Основные термодинамические, теплофизические и специфические свойства изотопа гелия-3 и p - T диаграмма.
13. Взаимосвязь энтропии и температуры. Закон Нернста о недостижимости абсолютного нуля температур.
14. Процесс сжатия реального газа. Изменение основных термодинамических величин и построение процесса сжатия газа в T - s диаграммах криоагентов.
15. Изоэнтропное расширение. Изменение основных термодинамических величин при изоэнтропном расширении криоагентов.
16. Адиабатное расширение газа с совершением внешней работы в объемных и лопаточных машинах. Теоретическая индикаторная диаграмма поршневого детандера. Схема и принцип действия турбодетандера.
17. Процесс дросселирования. Изменение температуры в процессе адиабатного дросселирования. Эффекта Джоуля-Томсона. Дифференциальный дроссель-эффект. Точки инверсии, кривая инверсии.
18. Сопоставление изоэнтропного и изоэнтальпийного расширений как способа охлаждения в однофазной и двухфазной областях.
19. Охлаждение с помощью откачки паров. Состояние равновесия между жидкостью и паром. Количественная оценка процесса. Диапазоны температур, получаемых с помощью криожидкостей.
20. Адиабатное размагничивание. Термодинамика процесса. Использование адиабатного размагничивания для получения температур ниже одного кельвина. T - s диаграмма парамагнитной соли. Процесс адиабатного размагничивания парамагнитной соли.
21. Принципиальная схема и цикл в T - s диаграмме магнитной криогенной машины. Конструктивная схема и принцип работы поршневой магнитной криогенной машины.
22. Десорбционное охлаждение. Схема аппарата для десорбционного охлаждения. Конструктивная схема и принцип работы десорбционного регенеративного охладителя.
23. Адиабатное намагничивание сверхпроводников. T - s диаграмма сверхпроводника. Зависимость критической напряженности магнитного поля от температуры.
24. Процесс охлаждения по методу Померанчука в фазовой и энтропийной диаграммах. Особенности протекания процесса и трудности практического воплощения.
25. Способ охлаждения основанный на тепловом эффекте растворения изотопа He3 в He4. Фазовая диаграмма смеси He3 и He4. Принципиальная схема рефрижератора растворения. Холодопроизводительность и предельная температура, получаемые в рефрижераторе.
26. Обратимый цикл криогенного термостатирования (цикл Карно). Полная и полезная холодопроизводительность. Минимальная работа цикла.

27. Идеальный цикл ожижения газа. Полная и полезная холодопроизводительность. Минимальная работа цикла.
28. Классификация криогенных установок по назначению, по способу получения холода.
29. Холодопроизводительность, затраты работы, потери, и эффективность реальных криогенных циклов.
30. Структура криогенных циклов. Целесообразное число ступеней охлаждения. Определение температурных уровней после каждой ступени охлаждения и давления прямого и обратного потоков.
31. Выбор допускаемых потерь и коэффициентов при расчете реальных криогенных циклов.
32. Основные характеристики криогенных циклов в рефрижераторном режиме и режиме ожижения.
33. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с внешним охлаждением криогенных циклов.
34. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с расширением потока в детандере криогенных циклов.
35. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с расширением потока в дроссельном устройстве криогенных циклов.
36. Криогенный цикл с простым дросселированием. Основные характеристики.
37. Криогенный цикл с предварительным охлаждением и дросселированием. Основные характеристики.
38. Криогенный цикл с дросселированием, предварительным охлаждением в КГМ. и эжектором. Основные характеристики.
39. Криогенный цикл с двойным дросселированием и циркуляцией части потока. Основные характеристики.
40. Газовый детандерный криогенный цикл с одной ступенью охлаждения и его основные характеристики.
41. Газовый детандерный криогенный цикл с двумя ступенями охлаждения и его основные характеристики.
42. Определение оптимального перепада давления в детандере газового детандерного цикла. Сравнительные характеристики газовых циклов. Термодинамический анализ детандерного цикла.
43. Ожижительный комбинированный цикл с дросселированием и расширением криоагента в детандере высокого давления с двумя ступенями охлаждения. Определение доли детандерного потока.
44. Ожижительный комбинированный цикл с дросселированием и расширением криоагента в детандере среднего давления с двумя ступенями охлаждения. Определение доли детандерного потока.
45. Криогенный цикл низкого давления с турбодетандером.
46. Криогенный цикл с расширением в детандере, дросселированием и предварительным охлаждением.
47. Криогенный цикл с парожидкостным детандером.
48. Обратный цикл КГМ Стирлинга и схема его реализации в поршневой машине.
49. Схема и цикл КГМ Гиффорда-Мак-Магона.
50. Цикл КГМ Вюльмье-Такониса. Схема действия и диаграммы рабочего процесса.
51. Бинарные и многокомпонентные смеси. Методы выражения концентраций. Правило фаз Гиббса. Особенности поведения бинарных смесей в двухфазной области. Диаграммы бинарной смеси, построение процессов испарения и конденсации.
52. Метод разделения двухкомпонентной смеси кипением-конденсацией.
53. Разделение воздуха методом ректификации. Понятие о теоретической ректификационной тарелке.
54. Ректификационная колонна воздухоразделительной установки.
55. Типы ректификационных колонн.

56. Составление энергетических и материальных балансов ректификационных колонн и определение основных технологических потоков, а также нагрузки на конденсатор-испаритель.
57. Определение числа действительных ректификационных тарелок.
58. Материальный баланс установки разделения воздуха и определение доли получаемого кислорода. Составляющие потерь холода ВРУ для производства газообразных продуктов разделения; их определение.
59. Принцип построения и определения рабочего давления цикла ВРУ высокого давления для производства газообразных продуктов разделения. Баланс энергии. Определение удельного расхода энергии.
60. Необходимость очистки и осушки воздуха перед криогенными установками. Способы осушки газов (адсорбционная, вымораживанием).
61. Методы очистки воздуха от двуокиси углерода (химический, адсорбционный, вымораживанием).
62. ВРУ низкого давления.
63. ВРУ среднего давления.
64. ВРУ высокого давления
65. Получение инертных газов в воздухоразделительных установках. Получение чистого аргона.
66. Мембранное разделение воздуха.
67. Разделение воздуха методом короткоциклового адсорбции.

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов: В 2 т. Т.1. Основы теории и расчета / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
2. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов: В 2 т. Т.1. Основы теории и расчета / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с. (25 экз. + эл. вариант)

Дополнительная литература

1. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.П. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков; Под ред. М.П. Малкова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
2. Теплофизические свойства криопродуктов / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов, А.В. Зайцев. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
3. Термодинамические основы криогенной техники / В.М. Бродянский, А.М. Семенов. – М.: Энергия, 1980. – 447 с.
4. Искусство криогеники. Низкотемпературная техника в физическом эксперименте, промышленных и аэрокосмических приложениях. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Г. Вентура, Л. Ризергари – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. 336с.
5. Баррон Р.Ф. Криогенные системы: Пер. с англ. – 2-изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 408 с.
6. Журнал «Холодильная техника».

Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: [сайт]. URL: <http://www.elibrary.ru>;
2. Камчатский государственный университет: [сайт]. URL: <http://www.kamchatgtu.ru>;
3. <http://www.holodilshchik.ru>;
4. <http://www.kriotek.ru>

7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

При изучении дисциплины рекомендуется использовать учебное издание «Теория и расчет циклов криогенных систем: Курс лекций» / И.П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2020ю – 77 с.

Методические рекомендации по выполнению расчетно-графических работ содержатся в методических указаниях:

1. Научные основы криологии: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 31 с.
2. Теория и расчет циклов криогенных систем: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 80 с.

8. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТА)

Не предусмотрено.

9. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ, ВКЛЮЧАЯ ПЕРЕЧЕНЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

Перечень программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса:

- приложение Microsoft Power Point;
- текстовый редактор Microsoft Office Word.

Перечень информационно-справочных систем:

- единая информационная образовательная среда университета «ЭИОС КамчатГТУ»;
- электронная библиотечная система;
- научная электронная библиотека eLIBRARY.RU;
- электронный каталог научно-технической библиотеки КамчатГТУ.

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Материально-техническая база для осуществления образовательного процесса по дисциплине, имеющаяся в распоряжении КамчатГТУ:

- для проведения занятий лекционного типа, практических (семинарских) занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, специализированная учебная аудитория 3-213 с комплектом учебной мебели;
- для самостоятельной работы обучающихся – аудитория 3-208, оборудованная комплектом учебной мебели;
- читальный зал и библиотечные каталоги научно-технической библиотеки КамчатГТУ;
- мультимедийное оборудование (ноутбук, проектор).

Перечень программных продуктов, используемых при проведении различных видов занятий

- презентации в Power Point по темам курса.

Дополнения и изменения в рабочей программе за _____ / _____ учебный год

В рабочую программу по дисциплине _____ Криогенные системы

для направления (ний) _____ 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы
специальности (тей) _____ жизнеобеспечения»

вносятся следующие дополнения и изменения:

Дополнения и изменения внес _____
(должность, Ф.И.О., подпись)

Рабочая программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры _____ ТМО
(наименование кафедры)

Протокол № _____ от «_____» _____ 202__ г.

Заведующий кафедрой
«_____» _____ 202__ г. _____ (подпись) _____ (Ф.И.О.)