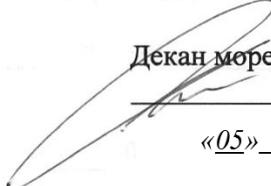


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Факультет Мореходный  
(наименование факультета, к которому относится кафедра)

Кафедра Технологические машины и оборудование  
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ  
Декан мореходного факультета  
  
Труднев С.Ю.

«05» 03 2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

***«Теория и расчет циклов криогенных систем»***

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

направленность (профиль) «Холодильная техника и технологии»

Петропавловск-Камчатский,  
2020 г.

Рабочая программа составлена на основании ФГОС ВО по направлению подготовки 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» (уровень бакалавриата) в соответствии с рабочим учебным планом подготовки бакалавров ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», одобренным Ученым советом вуза (протокол № 7 от 18.03.2020 г.)

Составитель рабочей программы

доцент  
(должность, ученое звание, степень)

  
(подпись)

Сарайкина И.П.  
(Ф.И.О.)

Рабочая программа рассмотрена на заседании кафедры

ТМО  
(наименование кафедры)

Протокол № 9 от «05» 03 2020

«05» 03 2020

  
(подпись)

Костенко А.В.  
(Ф.И.О.)

## 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.

*Цель* преподавания дисциплины «Теория и расчет циклов криогенных систем»:

- обобщить и конкретизировать знания по основополагающим принципам получения и применения криогенных температур;
- подготовить к самостоятельному термодинамическому анализу и расчету рабочих процессов в криогенных системах, а также к выбору рациональных методов достижения целей технического задания при создании криогенных установок.
- освоение принципов рационального построения технологических схем ожижительных и рефрижераторных криогенных установок и современных методов их расчета и проектирования;

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

- применение принципов термодинамики для расчета и анализа криогенных установок;
- оценка степени термодинамического совершенства (энергетической эффективности) циклов реальных криогенных установок;
- изучение методов понижения температуры рабочих тел криогенных установок;
- изучение принципа действия и конструкции установок для ожижения газов и криостатирования;
- определение путей совершенствования криогенных установок и нахождение возможностей снижения затрат энергии при создании новых типов установок;
- расчет и оптимизация циклов криогенных систем.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Теория и расчет циклов криогенных систем» направлен на формирование *профессиональных компетенций* (ПК) в области проектно-конструкторской и производственно-технологической деятельности, на которые ориентирована программа бакалавриата:

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

- готовность выполнять проектно-конструкторские и расчетные работы машин и аппаратов и их элементов, холодильной и криогенной техники и систем жизнеобеспечения с использованием современных вычислительных методов (ПК-9);
- готовность участвовать во внедрении технологических процессов наукоемкого производства, контроля качества материалов, процессов повышения надежности и износостойкости элементов и узлов машин и установок, низкотемпературных систем различного назначения (ПК-14).

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

Код компетенции	Планируемые результаты освоения образовательной программы	Планируемый результат обучения по дисциплине	Код показателя освоения
ПК-9	готовность выполнять проектно-конструкторские и расчетные работы машин и аппаратов и их элементов, холодильной и криогенной техники и систем жизнеобеспечения с использованием современных вычислительных методов	<i>знать:</i>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>– базовые законы и понятия криологии;</li> <li>– термодинамические циклы ожижительных и рефрижераторных криогенных установок;</li> <li>– принципы построения и расчета циклов криогенных установок;</li> <li>– основные параметры криогенных установок, их расчет и оптимизацию;</li> </ul>	3(ПК-9)1 3(ПК-9)2 3(ПК-9)3
		<i>уметь:</i>	
		– определять термодинамические параметры	У(ПК-9)1

		<p>криоагентов и строить процессы охлаждения, криостатирования, ожижения, переноса теплоты на более высокий температурный уровень в термодинамических T,s-диаграммах;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– рассчитывать и строить в термодинамических T,s-диаграммах и рассчитывать термодинамические циклы ожижительных и рефрижераторных криогенных установок;</li> <li>– рассчитывать основные характеристики криогенных циклов, проводить их оптимизацию по давлению, температуре и перераспределению расхода по машинам и аппаратам;</li> </ul>	У(ПК-9)2
			У(ПК-9)3
		<p><i>владеть навыками:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– проектирования, эксплуатации и рационального ведения технологических процессов в криогенных установках;</li> <li>– расчета и анализа характеристик конкретных криогенных установок и систем;</li> </ul>	В(ПК-9)1
ПК-14	готовность участвовать во внедрении технологических процессов наукоемкого производства, контроля качества материалов, процессов повышения надежности и износостойкости элементов и узлов машин и установок, низкотемпературных систем различного назначения	<p><i>знать:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– круг практических задач решаемых посредством криогенной техники;</li> <li>– технологию получения и использования криогенных температур;</li> <li>– термодинамические процессы, осуществление которых позволяет решать технологические задачи криогенной техники;</li> </ul>	З(ПК-14)1
			З(ПК-14)2
			З(ПК-14)3
		<p><i>уметь:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– термодинамически анализировать процессы и циклы криогенных систем;</li> <li>– оценивать степень энергетической эффективности работы криогенных систем с целью оптимизации энергозатрат и производительности установок;</li> </ul>	У(ПК-14)1
			У(ПК-14)2
	<p><i>владеть навыками:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– сбора и анализа научно-технической информации, изучение передового отечественного и зарубежного опыта в области инженерной криологии;</li> </ul>	В(ПК-14)1	

### 3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Учебная дисциплина «Теория и расчет циклов криогенных систем» является вариативной дисциплиной в структуре образовательной программой подготовки бакалавров по направлению 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и систем жизнеобеспечения».

Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин: «Высшая математика», «Физика», «Термодинамика и тепломассообмен», «Криофизика» «Теоретические основы холодильной техники», «Низкотемпературные машины» и «Тепло-массообменные аппараты низкотемпературных установок».

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины, используются при изучении профильных дисциплин учебного плана: «Экспериментальные методы исследования», «Основы научных исследований», «Экономика научных исследований».

### 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 течение 7 семестра обучения.

Тематический план дисциплины по очной форме обучения представлен в таблице 3.1., по заочной форме обучения – в таблице 3.2.

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			
<b>Раздел 1. Циклы криогенных установок</b>	<b>46</b>	<b>35</b>	<b>11</b>	<b>24</b>		<b>11</b>	<b>О</b>	
Тема 1. Идеальные циклы криостатирования и ожижения	9	4	2	2		5	ПЗ О Кл	
Тема 2. Ступени охлаждения и циклы криогенных установок	37	31	9	22		6	ПЗ РГР О Кл	
<b>Раздел 2. Циклы криогенных машин</b>	<b>26</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>10</b>		<b>10</b>	<b>О</b>	
Тема 3. Криогенные газовые машины	15	10	4	6		5	ПЗ О Кл	
Тема 4. Пульсационные криогенераторы	11	6	2	4		5	ПЗ О Кл	
<b>Зачет</b>								
<b>Всего</b>	<b>72</b>	<b>51</b>	<b>17</b>	<b>34</b>		<b>21</b>		

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

Таблица 3.2. – Тематический план дисциплины по заочной форме обучения

Наименование разделов и тем	Всего часов	тор-ные	Контактная работа по видам учебных занятий	тож-тель-теку-	теку-щего	контроль	зна-ний
-----------------------------	-------------	---------	--	----------------	-----------	----------	---------

			Лекции	Семинары (практические занятия)	Лабораторные работы			
<b>Раздел 1. Циклы криогенных установок</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>		<b>40</b>	<b>О</b> <b>ПЗ</b> <b>РГР</b>	
<b>Раздел 2. Циклы криогенных машин</b>	<b>24</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>		<b>20</b>	<b>О</b> <b>ПЗ</b>	
<b>Зачет</b>	<b>4</b>							<b>4</b>
<b>Всего</b>	<b>72</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>		<b>60</b>		<b>4</b>

*Примечание: О – опрос; ПЗ – практические задания; РГР – расчетно-графическая работа (контрольная работа для студентов ЗФО);*

### **Раздел 1. Технологические задачи инженерной криологии**

#### **Тема 1. Практическое использование низких температур**

*Лекция.* Введение. Идеальные циклы и процессы криогенных систем.

*Рассматриваемые вопросы.* Обратимый цикл криогенного криостатирования (цикл Карно). Идеальный цикл ожижения газа. Уравнение Карно-Клаузиуса. 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?

*Основные понятия темы:* Идеальный цикл криостатирования. Идеальный цикл ожижения газа. Полная и полезная холодопроизводительность.

#### **Тема 2. Ступени охлаждения и циклы криогенных установок**

*Лекция.* Классификация криогенных установок и циклов криогенных систем. Реальные циклы.

*Рассматриваемые вопросы.* Классификация криогенных установок по назначению, по способу получения холода. Холодопроизводительность, затраты работы, потери, и эффективность реальных циклов.

*Лекция.* Ступени охлаждения криогенных циклов.

*Рассматриваемые вопросы.* Ступени с внешним охлаждением, с расширением потока в детандере, с расширением потока в дроссельном устройстве ожижительных и рефрижераторных циклов.

*Практическое занятие.* Энергетические баланс отдельных ступеней охлаждения крио-

генных 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 концевой 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.

*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.

*Лекция.* Комбинированные циклы с дросселированием и расширением криоагента в детандерах.

*Рассматриваемые вопросы.* 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 Гейланда?
- 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?

## **Раздел 2. Циклы криогенных машин**

### **Тема 3. Криогенные газовые машины**

*Лекция.* Цикл криогенной газовой машины Стирлинга.

*Рассматриваемые вопросы.* 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.

*Практическое занятие.* Схема и индикаторная диаграмма криогенной газовой машины Стирлинга.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Схема криогенной газовой машины для ожижения воздуха, работающая по циклу Стирлинга.

*Контрольные вопросы*

- 1) Какие основные элементы должны входить в установку, работающую по обратному циклу Стирлинга?
- 2) В чем заключается принцип работы регенератора?
- 3) Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Стирлинга?

*Лекция.* Цикл криогенной газовой машины Гиффорда-Мак-Магона.

*Рассматриваемые вопросы.* Цикл криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона. Принципиальная схема и цикл криогенатора Гиффорда – Мак-Магона.

*Практическое занятие.* Схема и индикаторная диаграмма криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона.

*Рассматриваемые вопросы.* Схема одно- и двухступенчатой машины Гиффорда-Мак-Магона с золотниковым газораспределителем.

*Контрольные вопросы*

- 1) Какие основные элементы должны входить в установку, работающую по обратному циклу Гиффорда-Макмагона?
- 2) Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Гиффорда-Макмагона?

*Основные понятия темы:* Обратные циклы КГМ Стирлинга и Эриксона. Цикл КГМ Гиффорда – Мак-Магона. Принципиальные схемы КГМ.

### **Тема 4. Пульсационные криогенераторы**

*Лекция.* Циклы пульсационных криогенераторов.

*Рассматриваемые вопросы.* Схемы одноступенчатой и двухступенчатой пульсационных труб. Схемы пульсационных охладителей газа. Цикл Вюльмье-Такониса.

*Практическое занятие.* Криогенная газовая машина Вюльмье-Такониса.

*Рассматриваемые вопросы.* Схема действия криогенной газовой машины Вюльмье-Такониса с двумя вытеснителями и диаграммы рабочего процесса.

*Контрольные вопросы*

- 1) В чем заключается принцип работы термокомпрессора?
- 2) Какие процессы составляют цикл криогенной газовой машины Вюльмье-Такониса?

*Основные понятия темы:* Цикл и принципиальная схема Вюльмье-Такониса.

*Практическое занятие.* Коллоквиум.

*Семинар.* 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) Привести последовательность процессов в обратном цикле Стирлинга.
- 4) В чем заключается принцип работы криогенной газовой машины Стирлинга.
- 5) Как работает криогенная газовая машина Гиффорда-Макмагона?
- 6) Привести цикл работы криогенной газовой машины Гиффорда-Макмагона.
- 7) Какие потери холодопроизводительности имеются в криогенных газовых машинах?
- 8) В чем состоит отличие и сходство криогенных газовых машин Стирлинга и Вюльемье-Такониса?
- 9) Описать процессы цикла Вюльемье.
- 10) Дать сравнительный анализ энергетической эффективности криогенных газовых машин?

#### **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;
- подготовка к практическим занятиям;
- чтение и проработка рекомендованной основной и дополнительной литературы;
- подготовка к текущему (коллоквиум) и итоговому (промежуточной аттестации) контролю знаний по дисциплине (зачет)

#### Тема 2:

Выполнение и защита расчетно-графической работы (контрольная работы – для студентов заочной формы обучения) «Расчет цикла криогенной установки».

Аудиторная и внеаудиторная СРС выполняется в соответствии с методическими указаниями – Сарайкина И.П. Теория и расчет циклов криогенных систем: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 80 с.

#### **5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ЗАЧЕТ)**

1. Обратимый цикл криогенного термостатирования (цикл Карно). Полная и полезная холодопроизводительность. Минимальная работа цикла.
2. Идеальный цикл ожижения газа. Полная и полезная холодопроизводительность. Минимальная работа цикла.
3. Классификация криогенных установок по назначению, по способу получения холода.
4. Холодопроизводительность, затраты работы, потери, и эффективность реальных криогенных циклов.
5. Структура криогенных циклов. Целесообразное число ступеней охлаждения. Определение температурных уровней после каждой ступени охлаждения и давления прямого и обратного потоков.
6. Выбор допускаемых потерь и коэффициентов при расчете реальных криогенных циклов.
7. Основные характеристики криогенных циклов в рефрижераторном режиме и режиме ожижения.
8. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с внешним охлаждением криогенных циклов.

9. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с расширением потока в детандере криогенных циклов.
10. Энергетические баланс и определение удельной холодопроизводительности ступени с расширением потока в дроссельном устройстве криогенных циклов.
11. Криогенный цикл с простым дросселированием. Основные характеристики.
12. Криогенный цикл с предварительным охлаждением и дросселированием. Основные характеристики.
13. Криогенные циклы с несколькими ступенями предварительного охлаждения. Основные характеристики.
14. Криогенный цикл с дросселированием, предварительным охлаждением в КГМ. и эжектором. Основные характеристики.
15. Криогенный цикл с двойным дросселированием и циркуляцией части потока. Основные характеристики.
16. Газовый детандерный криогенный цикл с одной ступенью охлаждения и его основные характеристики.
17. Газовый детандерный криогенный цикл с двумя ступенями охлаждения и его основные характеристики.
18. Определение оптимального перепада давления в детандере газового детандерного цикла. Сравнительные характеристики газовых циклов. Термодинамический анализ детандерного цикла.
19. Ожижительный комбинированный цикл с дросселированием и расширением криоагента в детандере высокого давления с двумя ступенями охлаждения. Определение доли детандерного потока.
20. Ожижительный комбинированный цикл с дросселированием и расширением криоагента в детандере среднего давления с двумя ступенями охлаждения. Определение доли детандерного потока.
21. Криогенный цикл низкого давления с турбодетандером.
22. Криогенный цикл с расширением в детандере, дросселированием и предварительным охлаждением.
23. Криогенный цикл с парожидкостным детандером.
24. Обратный цикл КГМ Стирлинга и схема его реализации в поршневой машине с двумя поршнями регенератором и охладителем.
25. Цикл КГМ Стирлинга в машинах с гармоничным движением поршней.
26. Схема КГМ для ожижения воздуха, работающая по циклу Стирлинга.
27. Схема двухступенчатой КГМ Стирлинга.
28. Схема и цикл КГМ Гиффорда-Мак-Магона.
29. Схема одно- и двухступенчатой машины Гиффорда-Мак-Магона с золотниковым газораспределителем.
30. Цикл КГМ Вюльмье-Такониса. Схема действия и диаграммы рабочего процесса.

## **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. (25 экз. + эл. вариант)
2. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов: В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под общ.ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1998. – 720 с. (25 экз. + эл. вариант)

### *Дополнительная литература*

1. 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.
2. 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.
3. Теплофизические свойства криопродуктов / Л.А. Акулов, Е.И. Борзенко, В.Н. Новотельнов, А.В. Зайцев. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
4. Баррон Р.Ф. Криогенные системы: Пер. с англ. – 2-изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 408 с.
5. 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>

#### *Методические указания*

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

### **7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

При изучении дисциплины рекомендуется использовать методические указания (Сарайкина И.П. Теория и расчет циклов криогенных систем: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 80 с.), которые содержат:

- краткую характеристику дисциплины;
- цели и задачи изучения дисциплины;
- содержание дисциплины;
- содержание, варианты заданий и методические рекомендации по выполнению расчетно-графической работы (контрольной работы для студентов заочной формы обучения);
- перечень вопросов к промежуточной аттестации (экзамену);
- рекомендуемую литературу.

Содержание практических занятий и методические рекомендации по выполнению практических заданий по изучаемым темам также содержатся в методических указаниях по изучению дисциплины.

### **8. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (РАБОТА)**

Выполнение курсового проекта (работы) учебным планом 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.

## **11. 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 Теория и расчет циклов криогенных систем

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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Заведующий кафедрой

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г. \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)