

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.

« 20 » 03 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Научные основы криологии»**

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

направленность (профиль) «Холодильная техника и технологии»

Петропавловск-Камчатский,  
2019 г.

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

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

*Цель преподавания дисциплины:*

- обобщить и конкретизировать знания по основополагающим принципам получения низких температур;
- подготовить к самостоятельному термодинамическому анализу и расчету рабочих процессов в низкотемпературных установках, а также к выбору рациональных методов достижения целей технического задания.
- освоение принципов рационального построения технологических схем воздухоразделительных 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 низкотемпературных систем;
- оценка степени термодинамического совершенства (энергетической эффективности) циклов реальных низкотемпературных установок;
- проведение энтропийно-статистического метода оценки реальных энергетических потерь в низкотемпературных системах и установках;
- изучение методов разделения газовых смесей при низких температурах;
- изучение принципа действия и конструкции низкотемпературных машин и установок;
- определение путей совершенствования низкотемпературных установок и нахождение возможностей снижения затрат энергии при создании новых типов установок;
- расчет и оптимизация циклов и элементов криогенных систем.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Научные основы криологии» направлен на формирование *общепрофессиональных компетенций (ОПК) и профессиональных компетенций (ПК)* в области расчетно-экспериментальной с элементами научно-исследовательской деятельности, на которые ориентирована программа бакалавриата:

- способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий (ОПК-8);
- способность выявлять сущность научно-технических проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и привлекать для их анализа соответствующий физико-математический аппарат (ПК-1).

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	Планируемый результат обучения по дисциплине	Код показателя освоения
ОПК-8	способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в	<i>знать:</i> – круг практических задач решаемых посредством криологии;	З(ОПК-8)1
		<i>уметь:</i> – пользоваться учебной и справочной литерату-	У(ОПК-8)1



	требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий	рой в области холодильной и криогенной техники. <i>владеть навыками:</i> – сбора и обработки научно-технической информации, изучение передового отечественного и зарубежного опыта в области инженерной криологии;	V(ОПК-8)1
ПК-1	способность выявлять сущность научно-технических проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и привлекать для их анализа соответствующий физико-математический аппарат	<i>знать:</i> – базовые законы и понятия техники низких температур; – термодинамические процессы, осуществление которых позволяет решать технологические задачи инженерной криологии; – холодильные и криогенные системы: генераторы холода, тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты, «холодные» двигатели – генераторы работы; – особенности применения принципов энтропийно-статистического метода к анализу и расчету циклов криогенных систем; – принципы разделения воздуха и промышленных газов и методику расчета процесса криогенной ректификации; – технологические схемы основных типов установок для разделения воздуха и других газов и использования продуктов их разделения;	З(ПК-1)1 З(ПК-1)2 З(ПК-1)3 З(ПК-1)4 З(ПК-1)5 З(ПК-1)6
		<i>уметь:</i> – рассчитывать и строить процессы охлаждения, криостатирования, ожижения, разделения и очистки газовых смесей, переноса теплоты на более высокий температурный уровень в термодинамических T,s-диаграммах; – строить в термодинамических T,s-диаграммах и рассчитывать обратные термодинамические циклы для генерации холода, теплоты и работы; – составлять энергетические и энтропийные балансы низкотемпературных систем; – определять изменение состава двухкомпонентной смеси и тепловых эффектов в результате протекания термодинамических процессов; – выполнять расчет основных энергетических и конструктивных характеристик ректификационной колонны воздухоразделительной установки;	У(ПК-1)1 У(ПК-1)2 У(ПК-1)3 У(ПК-1)4 У(ПК-1)5
		<i>владеть навыками:</i> – проектирования, эксплуатации и рационального ведения технологических процессов в холодильных и криогенных установках, системах жизнеобеспечения; – расчета и анализа характеристик конкретных низкотемпературных установок и систем; – энтропийно-статистической анализа и оценки реальных энергетических потерь в низкотемпературных системах и установках;	V(ПК-1)1 V(ПК-1)2 V(ПК-1)3

### 3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Научные основы криологии» является обязательной дисциплиной вариативной части учебного плана 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», «Химия», «Термодинамика и тепломассообмен», «Криофизика» «Теоретические основы холодильной техники», «Низкотемпературные машины» и «Тепломассообменные 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. Технологические задачи инженерной криологии</b>	<b>41</b>	<b>35</b>	<b>11</b>	<b>24</b>		<b>6</b>	<b>О</b>	
Тема 1. Практическое использование низких температур	20	17	9	8		3	ПЗ Кл	
Тема 2. Энтропийно-статистический метод оценки энергетических потерь в низкотемпературных системах	21	18	2	16		3	ПЗ Кл	
<b>Раздел 3. Низкотемпературное разделение газовых смесей</b>	<b>31</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>10</b>		<b>15</b>	<b>О</b>	
Тема 3. Свойства и диаграммы газовых смесей.	7	4	2	2		3	ПЗ РГР Кл	
Тема 4. Низкотемпературная ректификация	24	12	4	8		12	ПЗ РГР 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	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. Технологические задачи инженерной криологии</b>	<b>34</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>		<b>30</b>	<b>О</b>	
Тема 1. Практическое использование низких температур	12	2	2			10	ПЗ	
Тема 2. Энтропийно-статистический метод оценки энергетических потерь в низкотемпературных системах	22	2		2		20	ПЗ	
<b>Раздел 3. Низкотемпературное разделение газовых смесей</b>	<b>34</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>		<b>30</b>	<b>О</b>	
Тема 3. Свойства и диаграммы газовых смесей.	12	2	2			10	ПЗ РГР	
Тема 4. Низкотемпературная ректификация	22	2		2		20	ПЗ РГР	
<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

*Рассматриваемые вопросы.* Роль и значение низких температур. Области современной криологии. Мировые достижения в инженерной криологии. История развития криологии в России и за рубежом. Вклад криологии в развитие техники, технологии и улучшение качества жизни. Области практического использования низких температур.

*Практическое занятие.* Тестирование и опрос по разделам курсов «Термодинамика и тепломассообмен», «Криофизика» и «Теоретические основы холодильной техники».

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Проверка остаточных знаний по изученным курсам «Термодинамика и тепломассообмен», «Криофизика» и «Теоретические основы холодильной техники».

*Лекция.* Термодинамические принципы взаимных преобразований теплоты и работы.

*Рассматриваемые вопросы.* Холод и теплота. Принцип сохранения энергии. Энергетический баланс. Принцип возрастания энтропии. Уравнение энтропийного баланса. Холодильные и криогенные системы: генераторы холода, тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты, «холодные» двигатели – генераторы работы.

*Лекция.* Классические технологические задачи инженерной криологии.



*Рассматриваемые вопросы.* Охлаждение (при  $p = const$  или  $v = const$ ). Криостатирование (при  $T_x = const$ ). Конденсация веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние. Ожижение, отвердевание и вымораживание газов. Разделение и очистка газовых смесей. Перенос теплоты на более высокий температурный уровень. Оценка степени термодинамического совершенства (энергетической эффективности) реальных установок.

*Практическое занятие.* Расчет идеальных (теоретических) процессов: охлаждения (при  $p = const$  или  $v = const$ ), криостатирования (при  $T_x = const$ ), конденсации веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние, ожижения, отвердевания и вымораживания газов, разделения и очистки газовых смесей, переноса теплоты на более высокий температурный уровень.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Построение процессов охлаждения (при  $p = const$  или  $v = const$ ), криостатирования (при  $T_x = const$ ), конденсации веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние, ожижения, отвердевания и вымораживания газов, разделения и очистки газовых смесей, переноса теплоты на более высокий температурный уровень в термодинамических  $T,s$ -диаграммах. Определение величины минимально необходимых затрат энергии (работы).

*Лекция.* Принципиальные схемы систем, осуществляющих обратные термодинамические циклы для генерации холода, теплоты и работы.

*Рассматриваемые вопросы.* Низкотемпературная машинная система – генератор холода. Высокотемпературная парокompрессионная машинная система для генерации теплоты – тепловой насос. Универсальная машинная система – тепловой насос с газовым циклом для генерации теплоты и холода. Низкотемпературный «холодный» двигатель – генератор работы. Высоко- и низкотемпературная система – генератор холода (за счет высокопотенциальной теплоты).

*Лекция.* Термодинамический анализ циклов газовых холодильных машин и пульсационных криогенераторов.

*Рассматриваемые вопросы.* Обратные (холодильные) циклы Стирлинга и Эриксона. Цикл криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона. Цикл пульсационных криогенераторов. Цикл Вюльмье-Такониса.

*Основные понятия темы:* Энергетический баланс. Принцип возрастания энтропии. Уравнение энтропийного анализа. Инженерная криология. Обратные термодинамические циклы для генерации холода, теплоты и работы. Термодинамический анализ циклов газовых холодильных машин и пульсационных генераторов.

## **Тема 2. Энтропийно-статистический метод оценки реальных энергетических потерь в низкотемпературных системах**

*Лекция.* Основы энтропийно-статистического метода оценки реальных энергетических потерь в низкотемпературных системах и установках (НТУ).

*Рассматриваемые вопросы.* Теоретические величины энергетических потерь в циклах НТУ. Величины действительно затрачиваемой работы для компенсации необратимости рабочих процессов и циклов НТУ. Энергетические потери, присущие низкотемпературным установкам в целом. Основные реальные необратимые процессы НТУ. Вычисление действительных величин производства энтропии. Стадии термодинамического анализа НТУ.

*Практическое занятие.* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа для исследования цикла парокompрессионной холодильной машины

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ фреонового (R22) рефрижераторного цикла одноступенчатой парокompрессионной холодильной машины. Определение основных параметров рабочих процессов и характеристик рефрижераторной установки. Определение удельных величин минимально необходимой (изотермической) работы для компенсации производства энтропии в основных узлах и процессах холодильной



установки. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие.* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа для исследования классических холодильных циклов для систем кондиционирования воздуха.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ простого и регенеративного циклов одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины, работающей в режиме кондиционирования воздуха с использованием различных холодильных агентов. Определение основных параметров рабочих процессов и характеристик рефрижераторной установки. Определение удельных величин минимально необходимой (изотермической) работы для компенсации производства энтропии в основных узлах и процессах холодильной установки. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие.* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа для исследования воздушного рефрижераторного рекуперативного цикла низкого давления с детандером.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ воздушного рефрижераторного рекуперативного цикла низкого давления с детандером (обратный цикл Брайтона). Определение основных параметров рабочих процессов и характеристик рефрижераторной установки. Определение удельных величин минимально необходимой (изотермической) работы для компенсации производства энтропии в основных узлах и процессах холодильной установки. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие .* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при исследовании цикла высокого давления для ожижения воздуха

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ классического цикла Линде – Хэмпсона и криогенной установки высокого давления для ожижения воздуха. Приближенное определение распределения затрат энергии по элементам низкотемпературной установки высокого давления для ожижения воздуха. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие .* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при исследовании цикла среднего давления с детандером для ожижения воздуха.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ цикла среднего давления (Гейландта) для ожижения воздуха. Определение основных параметров и характеристик цикла (Гейландта) и криогенной установки среднего давления с детандером для ожижения воздуха. Приближенное определение распределения затрат энергии по элементам низкотемпературной установки среднего давления для ожижения воздуха. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие.* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при исследовании воздушного рекуперативного цикла низкого давления с детандером для ожижения воздуха.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ воздушного рекуперативного цикла низкого давления (Капицы) с турбодетандером для ожижения воздуха. Определение основных характеристик цикла и установки для ожижения воздуха низкого давления с турбодетандером. Определение распределения затрат энергии по элементам криогенной установки низкого давления с турбодетандером для ожижения воздуха. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Практическое занятие.* Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при исследовании установок сжижения природного газа.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Термодинамический анализ установок



сжижения природного газа (метана  $\text{CH}_4$ ) с предварительным охлаждением малой производительности. Определение основных характеристик метанового цикла и цикла предварительного охлаждения для ожижения природного газа. Анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии.

*Основные понятия темы:* Энергетические потери в низкотемпературных системах. Энтропийно-статистический метод оценки реальных энергетических потерь. Термодинамический анализ низкотемпературных установок.

*Практическое занятие.* Коллоквиум.

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

*Контрольные вопросы:*

- 1) Принцип сохранения массы для (нерелятивистских) систем с многокомпонентными потоками.
- 2) Принцип сохранения энергии. Потоки энергии (тепловые, электрические, механические, магнитные и др.) и их численное определение.
- 3) Физический смысл энтальпии и полной энтальпии потока для открытых систем. Изменение энергии системы и ее составляющих.
- 4) Принцип составления энергетического баланса для открытых и закрытых низкотемпературных систем.
- 5) Принцип возрастания энтропии как следствие 2-го закона термодинамики.
- 6) Производство энтропии при осуществлении идеальных и реальных процессов в низкотемпературных установках.
- 7) Способы вычисления приращения энтропии в результате смещения.
- 8) Способы вычисления приращения энтропии в результате теплообмена.
- 9) Способы вычисления приращения энтропии в результате трения.
- 10) Энтропийный баланс низкотемпературных открытых систем.
- 11) Энтропийный баланс низкотемпературных закрытых систем.
- 12) Следствие принципа аддитивности энтропии.
- 13) Компенсация возрастания энтропии. Теорема Гюи- Стодолы.
- 14) Степень термодинамического совершенства установок.
- 15) Принцип аддитивности потерь и термодинамический анализ их распределения по элементам низкотемпературных установок.
- 16) Общие принципы термодинамического анализа и его методологические разновидности: энтропийный анализ и эксергетический анализ.
- 17) Генераторы холода.
- 18) Тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты.
- 19) «Холодные» двигатели – генераторы работы.
- 20) Охлаждение (при  $p = const$  или  $v = const$ ).
- 21) Криостатирование ( при  $T_x = const$ ).
- 22) Конденсация веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние.
- 23) Ожижение, отвердевание и вымораживание газов.
- 24) Разделение и очистка газовых смесей.
- 25) Перенос теплоты на более высокий температурный уровень.
- 26) Оценка степени термодинамического совершенства (энергетической эффективности) реальных установок.
- 27) Низкотемпературная машинная система – генератор холода.
- 28) Высокотемпературная парокомпрессионная машинная система для генерации теплоты – тепловой насос.
- 29) Универсальная машинная система – тепловой насос с газовым циклом для генерации теплоты и холода.
- 30) Низкотемпературный «холодный» двигатель – генератор работы.



- 31) Высоко- и низкотемпературная система – генератор холода (за счет высокопотенциальной теплоты).
- 32) Обратные (холодильные) циклы Стирлинга и Эриксона.
- 33) Схемы и диаграммы газовых холодильных машин, работающих по обратному циклу Стирлинга.
- 34) Схемы двухступенчатых холодильных машин Стирлинга.
- 35) Цикл криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона.
- 36) Принципиальная схема и цикл криогенатора Гиффорда – Мак-Магона.
- 37) Цикл пульсационных криогенаторов.
- 38) Схемы одноступенчатой и двухступенчатой пульсационных труб.
- 39) Схемы пульсационных охладителей газа.
- 40) Цикл Вюльме-Таклониса.
- 41) Схема действия холодильной машины Вюльме-Таклониса с двумя вытеснителями и диаграммы рабочего процесса.
- 42) Стадии энтропийно-статистического анализа низкотемпературной установки при оценке реальных энергетических потерь.
- 43) Теоретические величины энергетических потерь в циклах НТУ.
- 44) Величины действительно затрачиваемой работы для компенсации необратимости рабочих процессов и циклов НТУ.
- 45) Энергетические потери, присущие низкотемпературным установкам в целом.
- 46) Основные реальные необратимые процессы НТУ.
- 47) Вычисление действительных величин производства энтропии.

## *Раздел 2. Низкотемпературное разделение газовых смесей*

### **Тема 3. 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  $y$ - $x$  и  $i$ - $x, y$  воздуха.

*Рассматриваемые вопросы, задания, задачи и т.п.* Изучение структуры диаграммы  $y$ - $x$  и  $i$ - $x, y$  воздуха. Определение изменения состава двухкомпонентной смеси и тепловых эффектов в результате протекания термодинамических процессов.

*Основные понятия темы:* Концентрация. Правило фаз Гиббса. Диаграммы бинарной газовой смеси.

### **Тема 4. Низкотемпературная ректификация**

*Лекция 2.2.* Низкотемпературная ректификация.

*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

*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.

*Основные понятия темы:* Ректификация. Колонны однократной и двукратной ректификации. Определение числа ректификационных тарелок. Воздухоразделительные 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;
- 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)

Раздел 2:



Выполнение и защита расчетно-графической работы (контрольная работы – для студентов заочной формы обучения) «Расчет процесса ректификации воздуха».

Аудиторная и внеаудиторная СРС выполняется в соответствии с методическими указаниями – Сарайкина И.П. Научные основы криологии: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 31 с.

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

1. Принцип сохранения массы для (нерелятивистских) систем с многокомпонентными потоками.
2. Принцип сохранения энергии. Потоки энергии (тепловые, электрические, механические, магнитные и др.) и их численное определение.
3. Физический смысл энтальпии и полной энтальпии потока для открытых систем. Изменение энергии системы и ее составляющих.
4. Принцип составления энергетического баланса для открытых и закрытых низкотемпературных систем.
5. Принцип возрастания энтропии как следствие 2-го закона термодинамики.
6. Производство энтропии при осуществлении идеальных и реальных процессов в низкотемпературных установках.
7. Способы вычисления приращения энтропии в результате смещения.
8. Способы вычисления приращения энтропии в результате теплообмена.
9. Способы вычисления приращения энтропии в результате трения.
10. Энтропийный баланс низкотемпературных открытых систем.
11. Энтропийный баланс низкотемпературных закрытых систем.
12. Следствие принципа аддитивности энтропии.
13. Компенсация возрастания энтропии. Теорема Гюи- Стодолы.
14. Степень термодинамического совершенства установок.
15. Принцип аддитивности потерь и термодинамический анализ их распределения по элементам низкотемпературных установок.
16. Общие принципы термодинамического анализа и его методологические разновидности: энтропийный анализ и эксергетический анализ.
17. Генераторы холода.
18. Тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты.
19. «Холодные» двигатели – генераторы работы.
20. Охлаждение (при  $p = \text{const}$  или  $v = \text{const}$ ).
21. Криостатирование ( при  $T_x = \text{const}$ ).
22. Конденсация веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние.
23. Ожижение, отвердевание и вымораживание газов.
24. Разделение и очистка газовых смесей.
25. Перенос теплоты на более высокий температурный уровень.
26. Оценка степени термодинамического совершенства (энергетической эффективности) реальных установок.
27. Низкотемпературная машинная система – генератор холода.
28. Высокотемпературная парокompрессионная машинная система для генерации теплоты – тепловой насос.
29. Универсальная машинная система – тепловой насос с газовым циклом для генерации теплоты и холода.
30. Низкотемпературный «холодный» двигатель – генератор работы.
31. Высоко- и низкотемпературная система – генератор холода (за счет высокопотенциальной теплоты).

32. Обратные (холодильные) циклы Стирлинга и Эриксона.
33. Схемы и диаграммы газовых холодильных машин, работающих по обратному циклу Стирлинга.
34. Схемы двухступенчатых холодильных машин Стирлинга.
35. Цикл криогенной газовой машины Гиффорда – Мак-Магона.
36. Принципиальная схема и цикл криогенератора Гиффорда – Мак-Магона.
37. Цикл пульсационных криогенераторов.
38. Схемы одноступенчатой и двухступенчатой пульсационных труб.
39. Схемы пульсационных охладителей газа.
40. Цикл Вюльмье-Таклниса.
41. Схема действия холодильной машины Вюльмье-Такониса с двумя вытеснителями и диаграммы рабочего процесса.
42. Стадии энтропийно-статистического анализа низкотемпературной установки при оценке реальных энергетических потерь.
43. Теоретические величины энергетических потерь в циклах НТУ.
44. Величины действительно затрачиваемой работы для компенсации необратимости рабочих процессов и циклов НТУ.
45. Энергетические потери, присущие низкотемпературным установкам в целом.
46. Основные реальные необратимые процессы НТУ.
47. Вычисление действительных величин производства энтропии.
48. Бинарные и многокомпонентные смеси. Методы выражения концентраций. Правило фаз Гиббса.
49. Особенности поведения бинарных смесей в двухфазной области. Диаграммы бинарной смеси, построение процессов испарения и конденсации.
50. Минимальная работа и действительный расход энергии на разделение газовой смеси на компоненты.
51. Метод разделения двухкомпонентной смеси кипением-конденсацией.
52. Разделение воздуха методом ректификации. Понятие о теоретической ректификационной тарелке.
53. Ректификационная колонна воздухоразделительной установки.
54. Типы ректификационных колонн.
55. Составление энергетических и материальных балансов ректификационных колонн и определение основных технологических потоков, а также нагрузки на конденсатор-испаритель.
56. Определение числа действительных ректификационных тарелок.
57. Материальный баланс установки разделения воздуха и определение доли получаемого кислорода.
58. 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. Требования к низкотемпературной изоляции и её основные типы. Виды применяемых материалов. Использование вакуума.
63. Основные требования, предъявляемые к теплообменным аппаратам низкотемпературных установок.
64. ВРУ низкого давления.
65. ВРУ среднего давления.



66. ВРУ высокого давления
67. Получение инертных газов в воздухоразделительных установках.
68. Получение чистого аргона.
69. Мембранное разделение воздуха.
70. 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. (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. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем / А.М. Архаров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 507 с.
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. Теплофизические основы получения искусственного холода: Справочник серии «Холодильная техника» / Под ред. А.В. Быкова. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 231 с.
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>.

### *Методические указания*

1. Сарайкина И.П. Научные основы криологии: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 31 с.

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

При изучении дисциплины рекомендуется использовать методические указания (Сарайкина И.П. Научные основы криологии: Методические указания по изучению дисциплины / И. П. Сарайкина. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – 31 с.), которые содержат:

- краткую характеристику дисциплины;
- цели и задачи изучения дисциплины;
- содержание дисциплины;
- рекомендации по организации самостоятельной работы студентов;

- 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)**

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 Научные основы криологии

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.)