

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Физика и техника низких температур

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**УСТАНОВКИ РАЗДЕЛЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СМЕСЕЙ**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.06</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>3 семестр - 5;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>180 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>3 семестр - 32 часа;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>3 семестр - 32 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>3 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>3 семестр - 113,5 часов;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b>	
<b>Контрольная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>3 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пузина Ю.Ю.
	Идентификатор	Re86e9a56-Puzina-4d2acad1

Ю.Ю. Пузина

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Крюков А.П.
	Идентификатор	R9b81f956-KryukovAP-8dacf4ed

А.П. Крюков

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пузина Ю.Ю.
	Идентификатор	Re86e9a56-Puzina-4d2acad1

Ю.Ю. Пузина

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** изучение установок и систем разделения воздуха, природного газа и других газовых смесей для последующего использования при эксплуатации, разработке и проведении научно-исследовательских работ в области физики и техники низких температур.

### Задачи дисциплины

- изучить основные современные процессы разделения газовых смесей и основы системного анализа эффективности систем;
- овладеть информацией о современных системах и установках разделения смесей ;;
- изучение и обоснование конкретных технических решений при эксплуатации и конструировании систем разделения..

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-2 Способен проводить расчетно-теоретические и экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в конструкциях низкотемпературных установках	ИД-3ПК-2 Способен анализировать термодинамические свойства смесей, методы процессов разделения применительно к задачам низкотемпературной техники	знать: - основы технологий изготовления основных элементов и узлов систем разделения газов.  уметь: - разработать основы конструкций основных узлов систем разделения, выбирать конструкционные материалы для их изготовления.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Физика и техника низких температур (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать основы технологий изготовления основных элементов и узлов систем разделения газов
- уметь разработать основы конструкций основных узлов систем разделения, выбирать конструкционные материалы для их изготовления

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания
				Контактная работа							СР			
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль	
КПР	ГК	ИККП	ТК											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Физические принципы разделения газовых смесей	12	3	2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180
1.1	Физические принципы разделения газовых смесей	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	
2	Основы конденсационно-испарительного метода.	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180
2.1	Основы конденсационно-испарительного метода.	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	
3	Процесс ректификации	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180
3.1	Процесс ректификации	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	
4	Расчет числа теоретических тарелок	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180
4.1	Расчет числа теоретических тарелок	12		2	-	2	-	-	-	-	-	8	-	
5	Современное криогенное обеспечение процесса ректификации	10		2	-	2	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180

5.1	Современное криогенное обеспечение процесса ректификации	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	
6	Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 5-180
6.1	Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	
7	Получение чистых кислорода, азота и аргона	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 193-257
7.1	Получение чистых кислорода, азота и аргона	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	
8	Получение неона, гелия и водорода.	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 250-290
8.1	Получение неона, гелия и водорода.	10	2	-	2	-	-	-	-	-	-	6	-	
9	Разделение газов методом короткоциклового адсорбции	14	4	-	4	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 5-87
9.1	Разделение газов методом короткоциклового адсорбции	14	4	-	4	-	-	-	-	-	-	6	-	
10	Установки мембранного разделения.	14	4	-	4	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 260-270
10.1	Установки мембранного разделения.	14	4	-	4	-	-	-	-	-	-	6	-	
11	Установки для	14	4	-	4	-	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных</u></b>

	разделения природного газа												<b><u>источников:</u></b> [1], 294-312
11.1	Состав природного газа. Установки ожижения природного газа. Выделение «тяжелых» углеводородов и «неконденсирующихся» компонентов – азот и гелий.	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	
12	Получение особо чистых газов	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 315-345
12.1	Получение особо чистых газов	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>80</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>113.5</b>			

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

### **3.2 Краткое содержание разделов**

#### 1. Физические принципы разделения газовых смесей

##### 1.1. Физические принципы разделения газовых смесей

Термодинамические и теплофизические свойства инертных газов, азота, кислорода. Основные фазовые диаграммы. Фазовое равновесие жидкость-пар, жидкость- твердое тело, газ- твердое тело. Основные принципы разделения газовых смесей. Области применения и эффективность разделения смесей. Минимальная работа разделения..

#### 2. Основы конденсационно-испарительного метода.

##### 2.1. Основы конденсационно-испарительного метода.

Принцип конденсационно-испарительного метода. Тепловой и энергетический баланс. Непрерывное испарение и непрерывная конденсация. Прямоток и противоток паровой и жидкой фаз..

#### 3. Процесс ректификации

##### 3.1. Процесс ректификации

Ректификация. Конденсатор и испаритель ректификационной колонны . Определение полюса ректификационной колоны и рабочей линии ( конноды). Ректификационная тарелка. Эффективность ректификационной тарелки..

#### 4. Расчет числа теоретических тарелок

##### 4.1. Расчет числа теоретических тарелок

Расчет процесса ректификации методом Понсона и методом Мак-Кабе и Тиле. Сравнение методов..

#### 5. Современное криогенное обеспечение процесса ректификации

##### 5.1. Современное криогенное обеспечение процесса ректификации

Разделение воздуха методом низкотемпературной ректификации. Криогенные системы обеспечения ректификации. Сравнение различных криогенных систем. Технические характеристики установок разделения воздуха..

#### 6. Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки

##### 6.1. Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки

Азотная и кислородная ректификационная колонна. Особенности работы таких колонн. Системы очистки и осушки. Регенераторы воздуходелительных установок. Адсорбционная осушка и очистка..

#### 7. Получение чистых кислорода, азота и аргона

##### 7.1. Получение чистых кислорода, азота и аргона

Схемы получения чистого газообразного и жидкого азота и кислорода. Ректификация трехкомпонентной смеси: азот, кислород и аргон. Получение чистого аргона..

#### 8. Получение неона, гелия и водорода.

8.1. Получение неона, гелия и водорода.

Особенности получения неона, криптона и ксенона. Получение чистого газообразного гелия. Получение чистого газообразного водорода.

### 9. Разделение газов методом короткоциклового адсорбции

9.1. Разделение газов методом короткоциклового адсорбции

Физические принципы короткоциклового адсорбции. Типы адсорбентов и их характеристики. Принципиальные схемы разделения. Характеристики современных установок короткоциклового адсорбции и области их применения..

### 10. Установки мембранного разделения.

10.1. Установки мембранного разделения.

Физические принципы мембранного разделения. Типы мембран и их конструкция. Принципиальные схемы разделения. Характеристики современных установок мембранного разделения. Области применения таких установок..

### 11. Установки для разделения природного газа

11.1. Состав природного газа. Установки ожижения природного газа. Выделение «тяжелых» углеводородов и «неконденсирующихся» компонентов – азот и гелий.

### 12. Получение особо чистых газов

12.1. Получение особо чистых газов

Особенности получения особо чистых газов и области применения таких газов. Схемные решения. Современные методы анализа состава газовой смеси..

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Фазовые диаграммы температура- концентрация и энтальпия –концентрация для бинарных смесей. Фазовое равновесие пар-жидкость;
2. Получение азота и кислорода методом короткоциклового адсорбции;
3. Получение аргона, неона и ксенона и криптона.;
4. Колонны однократной ректификации;
5. Метод Понсона и метод Мак-Кабе и Тиле;
6. Расчет числа теоретических тарелок в ректификационной колонне.;
7. Непрерывное испарение и конденсация бинарной смеси. Прямоток и противоток.;
8. Анализ различных физических методов разделения газовых смесей.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ**

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)												Оценочное средство (тип и наименование)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
<b>Знать:</b>															
основы технологий изготовления основных элементов и узлов систем разделения газов	ИД-3ПК-2								+	+	+	+	+	+	Контрольная работа/Физические принципы разделения газовых смесей
<b>Уметь:</b>															
разработать основы конструкций основных узлов систем разделения, выбирать конструкционные материалы для их изготовления	ИД-3ПК-2	+	+	+	+	+	+								Контрольная работа/Современное криогенное обеспечение процесса ректификации

#### **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

##### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**3 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Современное криогенное обеспечение процесса ректификации (Контрольная работа)
2. Физические принципы разделения газовых смесей (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

##### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

Экзамен (Семестр №3)

В диплом выставляется оценка за 3 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

#### **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

##### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Архаров, А. М. Криогенные системы. Основы теории и расчета : учебник для вузов по специальностям "Криогенная техника" и "Холодильные и компрессорные машины и установки" / А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микулин . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1988 . – 464 с. - ISBN 5-217-00083-X .;
2. Авгуль, Н. Н. Адсорбция газов и паров на однородных поверхностях / Н. Н. Авгуль, А. В. Киселев, Д. П. Пошкус . – М. : Химия, 1975 . – 384 с.;
3. Антонов А. Н., Архаров А. М., Архаров И. А.- "Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты", (2-е изд., испр.), Издательство: "МГТУ им. Баумана", Москва, 2015 - (533 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/106308>.

##### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. Windows / Операционная система семейства Linux.

##### **5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:**

1. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
2. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
3. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>

#### **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор

занятий и текущего контроля	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-402, Аудитория каф. "НТ"	стеллаж для хранения книг, стул, стол письменный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	М-407/1, Кладовая	стеллаж для хранения инвентаря, стеллаж для хранения книг, инвентарь специализированный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Установки разделения низкотемпературных смесей

(название дисциплины)

#### 3 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

КМ-1 Физические принципы разделения газовых смесей (Контрольная работа)

КМ-2 Современное криогенное обеспечение процесса ректификации (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2
		Неделя КМ:	6	16
1	Физические принципы разделения газовых смесей			
1.1	Физические принципы разделения газовых смесей			+
2	Основы конденсационно-испарительного метода.			
2.1	Основы конденсационно-испарительного метода.			+
3	Процесс ректификации			
3.1	Процесс ректификации			+
4	Расчет числа теоретических тарелок			
4.1	Расчет числа теоретических тарелок			+
5	Современное криогенное обеспечение процесса ректификации			
5.1	Современное криогенное обеспечение процесса ректификации			+
6	Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки			
6.1	Колонны однократной и двукратной ректификации и системы очистки и осушки			+
7	Получение чистых кислорода, азота и аргона			
7.1	Получение чистых кислорода, азота и аргона		+	
8	Получение неона, гелия и водорода.			
8.1	Получение неона, гелия и водорода.		+	

9	Разделение газов методом короткоциклового адсорбции		
9.1	Разделение газов методом короткоциклового адсорбции	+	
10	Установки мембранного разделения.		
10.1	Установки мембранного разделения.	+	
11	Установки для разделения природного газа		
11.1	Состав природного газа. Установки ожижения природного газа. Выделение «тяжелых» углеводородов и «неконденсирующихся» компонентов – азот и гелий.	+	
12	Получение особо чистых газов		
12.1	Получение особо чистых газов	+	
Вес КМ, %:		50	50