

Учреждение образования  
«Международный государственный экологический институт  
имени А. Д. Сахарова»  
Белорусского государственного университета

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

по учебной и воспитательной работе

МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ

И. Э. Бученков

2021 г.

Регистрационный № УД-1033-21 /уч.

**ТЕРМОДИНАМИКА**

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:  
1-43 01 06 Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-43 01 06-2021 от и учебного плана учреждения образования по специальности 1-43 01 06 Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент рег. № 133-21/уч. от 14.05.2021, рег. № 136-21/уч.инт. з. от 14.05.2021

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

А.Л.Тимошук, доцент 0,5 ставки кафедры энергоэффективных технологий учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой энергоэффективных технологий учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета (протокол № 15 от 18.06.2021);

Советом факультета МОС Международного государственного экологического института им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета (протокол № 10 от 24.06.2021)



## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Дисциплина «Термодинамика» является базовой в системе подготовки инженеров-энергомеджеров. Термодинамика изучает термические, тепловые и другие свойства макроскопических тел статистическим и термодинамическим методами. Статистический метод исходит из представления о молекулярном строении вещества. Он основан на методах теории вероятности и математической статистики. Термодинамический метод основан на общих принципах или началах термодинамики, являющихся обобщением опытных фактов. Дисциплина «Термодинамика» необходима для изучения специальных дисциплин (механика жидкости и газа, теплопередача, производство, транспорт и потребление тепловой энергии и др.).

**Цель дисциплины** - дать студентам знания фундаментальных законов осуществления тепловых процессов, термодинамических методов анализа процессов и циклов, выработать навыки определения термодинамических характеристик процессов с различными рабочими телами, теплоносителями постоянного и переменного состава.

**Задачи дисциплины:**

- ознакомить студента с основными методами наблюдения, измерения и экспериментирования, а также сопроводить необходимыми физическими демонстрациями и лабораторными работами в физическом практикуме;
- представить элементарную физическую теорию в адекватной математической форме с целью научить студента использовать теоретические знания для решения практических задач.

Студент должен овладеть следующими компетенциями: уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

Для изучения дисциплины «Термодинамика» необходимы знания в области физики, химии, высшей математики. В свою очередь знания в области термодинамики используются далее при изучении ряда прикладных дисциплин (Теплопередача; Электротехника; Производство, транспорт и потребление тепловой энергии; Энергопотребление в зданиях и сооружениях) при курсовом и дипломном проектировании.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен

**знать:**

- законы термодинамики;
- термодинамические свойства и характеристики веществ;
- циклы тепловых двигателей и трансформаторов тепла;

**уметь:**

- рассчитывать термодинамические характеристики веществ и процессы для идеального и реального газа;
- рассчитывать циклы тепловых двигателей и трансформаторов тепла;

- применять основные законы термодинамики для решения прикладных задач;

- рассчитывать характеристики сосуществующих фаз и процессов фазовых превращений с помощью фазовых диаграмм состояния;

владеть:

- термодинамическими методами анализа систем преобразования видов энергии;

- термодинамическим принципом смещения равновесия для предсказания оптимальных условий проведения термодинамического процесса.

В соответствии с типовым учебным планом изучение дисциплины рассчитано на 165 ч. Аудиторное количество часов 68, из них лекции - 34 ч, практические занятия -18 ч, лабораторные занятия -16 ч.

Форма получения высшего образования - дневная.

Форма итоговой аттестации - экзамен во II семестре.

## Содержание учебного материала

### Наименование тем и их содержание

№ п/п	Наименование тем	Содержание
1	Введение. Первый закон термодинамики	<p>Энергетика и пути ее развития. Цель и задачи дисциплины. Предмет и методы термодинамики. Термодинамическая система и окружающая Среда. Параметры состояния. Равновесные и неравновесные состояния. Равновесные и неравновесные процессы. Уравнение состояния. Термодинамическая поверхность. Первый закон термодинамики как закон сохранения и превращения энергии, его аналитические выражения и формулировки. Различные виды энергии. Теплота и работа - формы передачи энергии. Внутренняя энергия и энтальпия как функции состояния. Работа изменения объема.</p>
2	Термодинамика идеального газа. Свойства и процессы. Термодинамика газовых смесей	<p>Уравнение состояния Клапейрона. Теплоемкость идеального газа. Внутренняя энергия, энтальпия и энтропия веществ в идеальном газе. Термодинамические таблицы и диаграммы. Основные термодинамические процессы (изохорный, изобарный, изотермический, изотропный). Сравнительный анализ политропных процессов. Расчет параметров состояния и энергетических характеристик процессов по таблицам энтальпии и энтропии идеальных газов.</p> <p>Смеси идеальных газов. Способы задания состава смеси. Закон Дальтона. Парциальные давления. Приведенные объемы. Кажущаяся молекулярная масса смеси. Газовая постоянная смеси. Плотность и теплоемкость газовой смеси. Внутренняя энергия и энтальпия газовой смеси. Энтропия газовой смеси. Энтропия смешения. Энергетический анализ процессов со смесями газов. Смеси реальных газов. Объемные и тепловые эффекты смешения и их зависимость от параметров смеси</p>
3	Второй закон термодинамики	<p>Формулировки второго закона термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Основные источники необратимости. Термодинамические циклы (прямые и обратные, обратимые и необратимые). Термический к.п.д. Источники теплоты. Прямой цикл Карно и его термический к.п.д. Обратный цикл Карно и его холодильный коэффициент. Теорема Карно и к.п.д. произвольного обратимого цикла.</p> <p>Обобщенный цикл Карно. Регенерация тепла. Термодинамические процессы и циклы в <math>T, s</math>- и <math>P, v</math>- диаграммах. Термодинамическая шкала температур. Абсолютный нуль температур. Изменение энтропии в необратимых процессах. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Возрастание энтропии изолированной системы. Энергия термомеханической системы. Энергия массы вещества в объеме. Энергия теплоты. Теорема Гюй - Стодоль. Расчет потерь энергии при необратимых процессах с использованием термодинамических таблиц и диаграмм.</p>

4	Термодинамика газовых циклов	<p>Техническая работа компрессора. Объемный к.п.д. компрессора, расчет мощности привода компрессора и отводимого при охлаждении тепла. Оптимальное распределение давлений по ступеням многоступенчатого компрессора. Цикл газотурбинных установок (ГТУ) с подводом тепла при постоянном давлении. Отношение работы компрессора к работе турбины. Термический к.п.д. цикла ГТУ. Цикл ГТУ с подводом тепла при <math>v = \text{const}</math>. Регенерация в ГТУ. Цикл ГТУ при необратимых процессах сжатия и расширения. Абсолютный внутренний к.п.д. необратимого цикла ГТУ. Выбор оптимальной степени повышения давления. Применение ступенчатого подвода тепла в цикле, многоступенчатого сжатия воздуха. Цикл сложной ГТУ при необратимом протекании процессов сжатия и расширения.</p> <p>Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Идеальные циклы ДВС с изохорным (цикл Отто), изобарным (цикл Дизеля) и комбинированным (цикл Тринклера) подводом тепла. Термический к.п.д. циклов. Мощность и удельные расходы топлива. Среднее индикаторное давление. Цикл Стирлинга. Цикл Брайтона. Цикл Эрикссона.</p> <p>Методы сравнения термических к.п.д. обратимых циклов. Метод к.п.д. в анализе необратимых циклов.</p>
5	Термодинамика реального газа	<p>Термодинамическая поверхность состояния реальных газов. Фазовые переходы. Правило фаз Гиббса. Фазовые диаграммы <math>p, T</math>; <math>p, v</math>; <math>T, s</math>. Условие устойчивости фаз. Фазовые переходы при неодинаковых давлениях фаз. Уравнение Пойнтинга. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела фаз.</p> <p>Кипящая жидкость и сухой насыщенный пар. Влажный пар. Степень сухости пара. Критические условия. Перегретый пар. Перегретая жидкость и переохлажденный пар. Термические и калорические свойства твердых тел и жидкостей. Вода и водяной пар. Аномалии воды. Термические и калорические свойства реальных газов. Диаграммы <math>h-p</math>, <math>h-T</math>, <math>h-s</math> реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Термодинамическое подобие веществ и закон соответственных состояний. Уравнение состояния Майера - Боголюбова. Эмпирические уравнения состояния. Теплоемкости <math>c_p</math> и <math>c_v</math> водяного пара. <math>T, s</math>- и <math>h, s</math>- диаграммы водяного пара. Расчет изобарного, изотермического, изохорного, адиабатного процесса и процесса дросселирования по термодинамическим таблицам и диаграммам.</p>

6	Термодинамика паровых циклов	<p>Цикл Ренкина, его термический к.п.д. Влияние начальных и конечных параметров на к.п.д. цикла паротурбинной установки. Кратность охлаждения.</p> <p>Цикл паротурбинной установки при необратимом протекании процесса расширения. Абсолютный внутренний к.п.д. относительный внутренний к.п.д. турбины. Эффективный абсолютный к.п.д. паротурбинной установки. Удельные расходы пара, тепла и топлива. Промежуточный перегрев пара и причины его применения. Теоретический и действительный циклы со вторичным перегревом пара. Регенерация в цикле ПТУ. Схемы регенеративного подогрева с отборами пара. Оптимальная температура подогрева питательной воды и максимальный к.п.д. регенеративного цикла. Коэффициент недовыработки отбора. Удельные расходы пара, тепло, топлива регенеративных ПТУ. Тепловой и энергетический балансы паротурбинной установки. Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела в ПТУ.</p> <p>Комбинированная выработка электроэнергии и теплоты на ТЭЦ. Термодинамические основы теплофикации. Удельная выработка электроэнергии на единицу отпущенной теплоты и коэффициент использования тепла. Циклы ПТУ с противодавлением, с ухудшенным вакуумом, с теплофикационными отборами пара.</p>
7	Термодинамика холодильных циклов	<p>Холодильный коэффициент. Холодопроизводительность. Теоретические и действительные циклы газовых холодильных установок. Теоретический и действительный циклы парокомпрессионных холодильных установок. Энергетический к.п.д. Цикл пароэжекторной холодильной установки (ПЭХУ). Цикл абсорбционной холодильной установки (АХУ). Коэффициенты теплоиспользования и энергетические к.п.д. ПЭХУ и АХУ. Методы ожижения газов. Цикл тепло насосной установки. Отопительный коэффициент. Применение тепло насосных установок в системах теплоснабжения, тепло хладоснабжения и кондиционирования воздуха</p>

8	Термодинамика потока	<p>Основные понятия и определения. Уравнение неразрывности. Уравнение движения. Уравнение первого закона термодинамики для стационарного потока массы. Располагаемая работа потока, техническая работа в потоке и подведенное к потоку тепло. Скорость звука. Адиабатное истечение газов и паров из суживающихся сопел. Зависимость скорости потока и расхода газа (пара) через сопло от отношения давлений. Адиабатное течение с трением. Коэффициенты скорости и расходы. Принцип обращения внешних воздействий. Условия перехода через скорость звука. Сопло Лаваля. Методика термодинамического расчета различных типов сопел при истечении газа и перегретого пара. Особенности истечения сухого насыщенного и влажного пара. Параметры торможения.</p> <p>Процессы адиабатного и изотермического дросселирования и их техническое применение. Эффект Джоуля-Томсона. Интегральный дроссель- эффект. Температурные эффекты адиабатного дросселирования реальных газов. Точка инверсии. Кривые инверсии в диаграммах <math>T, p - h, p - h, s - T, s</math>. Смешение газов и паров в потоке и при заполнении объема. Потеря энергии при смешении. Процессы в эжекторах. Коэффициент инжекции.</p> <p>Циклы и термические к.п.д. турбокомпрессорных и прямооточных бескомпрессорных воздушно-реактивных двигателей, пульсирующих бескомпрессорных ВРД, жидкостных ракетных двигателей, ядерных ракетных двигателей.</p>
9	Термодинамика парогазовых смесей	<p>Парогазовые смеси. Влажный воздух насыщенный и ненасыщенный. Температура точки росы. Абсолютная и относительная влажность. Массовое и мольное влагосодержание. Энтальпия и энтропия влажного воздуха. Степень насыщения. Газовая постоянная влажного воздуха. Плотность влажного воздуха. Температура мокрого термометра, <math>h, d - h, s</math>- диаграммы влажного воздуха. Термодинамические процессы в <math>h, d</math> - диаграмме (нагрев, охлаждение, смешение без подогрева и с подогревом, испарение). Процесс кондиционирования воздуха. Психрометр</p>
10	Комбинированные циклы и циклы атомных электростанций	<p>Бинарные циклы. Термодинамический анализ паро-паровых, паро-газовых и газо-паровых циклов. Применение магнетогидродинамического генератора в цикле МГД-установки, термический к.п.д. цикла. Термодинамические циклы атомных электростанций (АЭС). Схемы и циклы одноконтурных, двухконтурных и трехконтурных АЭС. Цикл насыщенного пара с промежуточной сепарацией. Цикл с сепарацией и перегревом пара.</p>

11	Основы химической термодинамики	Уравнения первого и второго законов термодинамики для процессов с химическими превращениями. Химическое равновесие, тепловые эффекты экзотермических и эндотермических реакций. Зависимость теплового эффекта от температуры, от агрегатного состояния веществ. Закон Гесса. Закон Лавуазье и Лапласа. Закон Кирхгофа. Уравнение Гиббса-Дюгема. Химическое сродство. Уравнение Гиббса - Гельмгольца. Константа равновесия. Зависимость константы равновесия от температуры. Степень диссоциации. Закон действующих масс. Правило Ле-Шателье - Брауна. Степень полноты реакции и состав равновесной смеси. Влияние давления и объема на степень диссоциации. Тепловая теорема Нернста. Третий закон термодинамики. Абсолютное значение энтропии. Расчеты с помощью таблиц стандартных величин и таблиц полных энтальпий и энтропий
----	---------------------------------	---

**Учебно-методическая карта дисциплины (дневная форма получения высшего образования)**

Номер темы	Наименование темы и (или) содержание	Количество аудиторных часов				Номер методического средства	Учебно-методические материалы	Номер формы контроля знаний
		Лекции	Практические (семинарские) занятия	Лабораторные занятия	Управляемая самостоятельная работа			
<b>Семестр 3:</b>								
1	Введение. Первый закон термодинамики	6	4	6				
2	Термодинамика идеального газа. Свойства и процессы. Термодинамика газовых смесей	8	4	6				
3	Второй закон термодинамики	6	4	6				
4	Термодинамика газовых циклов	6	2					
5	Термодинамика реального газа	6	4	6				
6	Термодинамика паровых циклов	6	2					
7	Термодинамика холодильных циклов	4	2	6				
8	Термодинамика потока	6	4	4				
<b>Семестр 4:</b>								
9	Термодинамика парогазовых смесей	8	4	6				
10	Комбинированные циклы и циклы атомных электростанций	6	2					

11	Основы химической термодинамики	6	2					
	<b>ИТОГО</b>	<b>68</b>	<b>34</b>	<b>40</b>				

**Учебно-методическая карта дисциплины (заочная форма получения высшего образования)**

Номер темы	Наименование темы и (или) содержание	Количество аудиторных часов				Номер методического средства	Учебно-методические материалы	Номер формы контроля знаний
		Лекции	Практические (семинарские) занятия	Лабораторные занятия	Управляемая самостоятельная работа			
<b>Семестр 5:</b>								
1	Введение. Первый закон термодинамики	2	2	2				
2	Термодинамика идеального газа. Свойства и процессы. Термодинамика газовых смесей	2	2	2				
3	Второй закон термодинамики	1		2				
4	Термодинамика газовых циклов	1						
5	Термодинамика реального газа	2						
6	Термодинамика паровых циклов	2						
<b>Семестр 6:</b>								
7	Термодинамика холодильных циклов	1	2	2				
8	Термодинамика потока	1						
9	Термодинамика парогазовых смесей	2	2	2				
10	Комбинированные циклы и циклы	2						

	атомных электростанций							
11	Основы химической термодинамики	2						
	<b>ИТОГО</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>10</b>				

*Перечень практических занятий для очной формы получения образования и их содержание*

№ п/п	Наименование тем	Содержание	Объем (часы)
1	Введение. Первый закон термодинамики	Первый закон термодинамики как закон сохранения и превращения энергии, его аналитические выражения и формулировки. Различные виды энергии. Теплота и работа - формы передачи энергии.	4
2	Термодинамика идеального газа. Свойства и процессы. Термодинамика газовых смесей	Сравнительный анализ политропных процессов. Расчет параметров состояния и энергетических характеристик процессов по таблицам энтальпии и энтропии идеальных газов. Смеси идеальных газов. Способы задания состава смеси. Закон Дальтона. Парциальные давления. Приведенные объемы. Кажущаяся молекулярная масса смеси.	4
3	Второй закон термодинамики	Прямой цикл Карно и его термический к.п.д. Обратный цикл Карно и его холодильный коэффициент. Теорема Карно и к.п.д. произвольного обратимого цикла. Расчет потерь энергии при необратимых процессах с использованием термодинамических таблиц и диаграмм.	4
4	Термодинамика газовых циклов	Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Идеальные циклы ДВС с изохорным (цикл Отто), изобарным (цикл Дизеля) и комбинированным (цикл Тринклера) подводом тепла. Термический к.п.д. циклов. Мощность и удельные расходы топлива	2
5	Термодинамика реального газа	Вода и водяной пар. Аномалии воды. Термические и калорические свойства реальных газов. Диаграммы $h-p$ , $h-T$ , $h-s$ реальных газов.	4
6	Термодинамика паровых циклов	Комбинированная выработка электроэнергии и теплоты на ТЭЦ. Термодинамические основы теплофикации. Удельная выработка электроэнергии на единицу отпущенной теплоты и коэффициент использования тепла.	2
7	Термодинамика холодильных циклов	Цикл тепло насосной установки. Отопительный коэффициент. Применение тепло насосных установок в системах теплоснабжения, тепло хладоснабжения и кондиционирования воздуха	2
8	Термодинамика потока	Процессы адиабатного и изотермического дросселирования и их техническое применение. Эффект Джоуля-Томсона. Интегральный дроссель- эффект. Температурные эффекты адиабатного дросселирования реальных газов.	4
9	Термодинамика парогазовых смесей	$h, d$ - и $h, s$ - диаграммы влажного воздуха. Термодинамические процессы в $h, d$ - диаграмме (нагрев, охлаждение, смешение без	4

		подогрева и с подогревом, испарение). Процесс кондиционирования воздуха. Психрометр	
10	Комбинированные циклы и циклы атомных электростанций	Термодинамические циклы атомных электростанций (АЭС). Схемы и циклы одноконтурных, двухконтурных и трехконтурных АЭС	2
11	Основы химической термодинамики	Расчеты с помощью таблиц стандартных величин и таблиц полных энтальпий и энтропий	2

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

Для организации самостоятельной работы студентов по курсу необходимо использовать современные технологии: разместить в сетевом доступе комплекс учебных и учебно-методических материалов (программа, методические указания к практическим занятиям, список рекомендуемой литературы и информационных ресурсов, задания в тестовой форме для самоконтроля и др.).

Эффективность самостоятельной работы студентов целесообразно проверять в ходе текущего и итогового контроля знаний в форме устного опроса, коллоквиумов, контрольных работ по темам и разделам курса (модуля).

Темы самостоятельных работ

1. Параметры состояния. Первый закон термодинамики.
2. Второй закон термодинамики. Изменение энтропии.
3. Термодинамические процессы идеального газа. Термодинамические свойства газовых смесей.
  4. Расчет циклов ГТУ. Расчет циклов ДВС.
  5. Термодинамические свойства и процессы водяного пара.
  6. Расчет процессов во влажном воздухе.
  7. Расчет комбинированных циклов.
  8. Расчет циклов холодильных установок и теплонасосных установок.
9. Термодинамика химических процессов. **Темы лабораторных занятий**
  1. Определение показателя адиабаты для воздуха.
  2. Измерение температуры и энергии фазовых переходов.
  3. Измерение теплоты испарения воды.
  4. Изучение процесса течения газа в сужающемся сопле.
  5. Изучение цикла холодильной установки и теплового насоса.
  6. Изучение цикла компрессионной установки.
  7. Изучение термодинамических свойств бинарных смесей.

С целью диагностики знаний, умений и навыков студентов по данной дисциплине рекомендуется использовать:

- 1) контрольные работы;
- 2) самостоятельные работы;
- 3) коллоквиумы по пройденному теоретическому материалу;
- 4) устный опрос в ходе практических занятий;
- 5) проверку конспектов лекций студентов;
- 6) тестирование, включая компьютерное.

## Рекомендуемая литература

### *Основная*

1. Трофимова, Т. И. Основы физики. Молекулярная физика. Термодинамика / Т. И. Трофимова. - М.: КноРус, 2011. - 192 с.
2. Базаров, И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. - М.: Высш. шк., 1991. — 272 с.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. - М.: Физматлит, 2014. - 544 с.
4. Иродов, И. Е. Физика макросистем. Основные законы / И. Е. Иродов. - С-П.: Физматлит, 2001. - 196 с.
5. Исаев, С. И. Курс химической термодинамики: учеб. пособие / С. И. Исаев. - М.: Высш. шк, 1986. - 272 с.

### *Дополнительная*

6. Бэр, Г. Д. Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения / Г. Д. Бэр. - М.: Мир, 1977. - 518 с.
7. Абт, Ф. Молекулярная физика в жизни, технике и природе: учеб. пособие / Ф. Абт. - СПб.: Лань, 2016. - 624 с.
8. Кузнецов, С. И. Курс физики с примерами решения задач. Ч. I. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика / С. И. Кузнецов. - СПб.: Лань, 2014.- 464 с.

**Протокол согласования рабочей программы с другими дисциплинами  
специальности**

Название дисциплины, изучение которой связано с дисциплиной рабочей программы	Кафедра, обеспечивающая изучение этой дисциплины	Предложения кафедры об изменениях в содержании рабочей программы	Решение кафедры, разработавшей рабочую программу (с указанием даты и номера протокола)
Согласования не требуется			

Зав. кафедрой  
энергоэффективных технологий

В.А.Пашинский