

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/423-573.1

от 20.04.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.05.02 Атомные станции: проектирование,  
эксплуатация и инжиниринг

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/В<br>СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экс./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|--|-----------|--|
| 5       | 2                      | 72                         | 32           | 16                        | 16                       | 8  | 0         | 3  |
| Итого   | 2                      | 72                         | 32           | 16                        | 16                       | 16   | 0         |  |

## АННОТАЦИЯ

Целью освоения учебной дисциплины является решение двуединой задачи – базовой профессиональной подготовки выпускников и формирования у них современного физического мировоззрения. В курсе систематически рассматриваются исходные понятия, основные законы и уравнения равновесной термодинамики. Излагаются вопросы применения методов термодинамики к исследованию равновесия и устойчивости однородных и многофазных систем, реальных газов, жидкостей и их потоков, циклов преобразования энергии. В части практических приложений основное внимание обращается на применение термодинамических методов для анализа процессов, происходящих в ядерных энергетических установках, а также вопросам энергоэффективности и экологии энергетических объектов.

Заключительные разделы курса посвящены основам неравновесной термодинамики. Рассматриваются принципы и феноменологические уравнения линейной неравновесной термодинамики, критерии устойчивости неравновесных систем, а также элементы нелинейной термодинамики, теории диссипативных структур и самоорганизации материи

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения учебной дисциплины является решение двуединой задачи – базовой профессиональной подготовки выпускников и формирования у них современного физического мировоззрения. В курсе систематически рассматриваются исходные понятия, основные законы и уравнения равновесной термодинамики. Излагаются вопросы применения методов термодинамики к исследованию равновесия и устойчивости однородных и многофазных систем, реальных газов, жидкостей и их потоков, циклов преобразования энергии. В части практических приложений основное внимание обращается на применение термодинамических методов для анализа процессов, происходящих в ядерных энергетических установках, а также вопросам энергоэффективности и экологии энергетических объектов.

Заключительные разделы курса посвящены основам неравновесной термодинамики. Рассматриваются принципы и феноменологические уравнения линейной неравновесной термодинамики, критерии устойчивости неравновесных систем, а также элементы нелинейной термодинамики, теории диссипативных структур и самоорганизации материи

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

В результате освоения данной дисциплины студент должен знать основные понятия, методы, законы и уравнения термодинамики, а также их основные следствия применительно к различным термодинамическим системам, включая ядерные энергетические установки.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|--|
|--------------------------------|--|

|  |  |
|--|--|
| <p>ОПК-1 [1] – Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования</p> | <p>З-ОПК-1 [1] – Знать: базовые законы естественнонаучных дисциплин; основные математические законы; основные физические явления, процессы, законы и границы их применимости; сущность основных химических законов и явлений; методы математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования<br/> У-ОПК-1 [1] – Уметь: выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат<br/> В-ОПК-1 [1] – Владеть: математическим аппаратом для разработки моделей процессов и явлений, решения практических задач профессиональной деятельности; навыками использования основных общефизических законов и принципов</p> |
| <p>ОПК-5 [1] – Способен оформлять результаты работы и научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ.</p>  | <p>З-ОПК-5 [1] – Знать: требования к оформлению результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ<br/> У-ОПК-5 [1] – Уметь: оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ<br/> В-ОПК-5 [1] – Владеть: навыками оформления результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ</p>  |

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| Задача профессиональной деятельности (ЗПД)   | Объект или область знания  | Код и наименование профессиональной компетенции;<br>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)                                      | Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции   |
|--|--|---|---|
| научно-исследовательский   |  |   |   |
| проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и | ядерно-физические процессы, протекающие в оборудовании и устройствах для выработки, преобразования и использования | ПК-1 [1] - Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области проектирования и эксплуатации ядерных | З-ПК-1[1] - знать современную техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области проектирования и эксплуатации ядерных |

|  |   |   |  |
|--|---|---|--|
| <p>использующих тепловую и ядерную энергию, включая входящие в их состав системы контроля, защиты, управления и обеспечения ядерной и радиационной безопасности</p>  | <p>ядерной и тепловой энергии; безопасность эксплуатации и радиационный контроль атомных объектов и установок;</p>  | <p>энергетических установок</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 24.078, 40.008, 40.011</p>  | <p>энергетических установок ;<br/>У-ПК-1[1] - уметь использовать научно-техническую информацию для проектирования и эксплуатации ядерных энергетических установок;<br/>В-ПК-1[1] - владеть методами поиска и анализа научно-технической информации и опыта в области проектирования и эксплуатации ядерных энергетических установок</p>  |
| <p>проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию, включая входящие в их состав системы контроля, защиты, управления и обеспечения ядерной и радиационной безопасности</p> | <p>ядерно-физические процессы, протекающие в оборудовании и устройствах для выработки, преобразования и использования ядерной и тепловой энергии; безопасность эксплуатации и радиационный контроль атомных объектов и установок;</p> | <p>ПК-2 [1] - Способен проводить математическое моделирование для анализа всей совокупности процессов в ядерно-энергетическом и тепломеханическом оборудовании АЭС</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 24.078, 40.008, 40.011</p> | <p>З-ПК-2[1] - знать методы математического анализа для моделирования процессов в ядерно-энергетическом и тепломеханическом оборудовании АЭС ;<br/>У-ПК-2[1] - уметь проводить математическое моделирование процессов в ядерно-энергетическом и тепломеханическом оборудовании АЭС ;<br/>В-ПК-2[1] - владеть стандартными пакетами автоматизированного проектирования и исследований</p> |
| <p>проектирование, создание и эксплуатация атомных станций и других ядерных энергетических установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих</p>   | <p>ядерно-физические процессы, протекающие в оборудовании и устройствах для выработки, преобразования и использования ядерной и</p>   | <p>ПК-3 [1] - Способен к проведению исследований физических процессов в ядерных энергетических установках в процессе разработки, создания, монтажа, наладки и эксплуатации</p>  | <p>З-ПК-3[1] - знать методы проведения исследований физических процессов ;<br/>У-ПК-3[1] - уметь проводить исследования и испытания оборудования ядерных энергетических</p>  |

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| тепловую и ядерную энергию, включая входящие в их состав системы контроля, защиты, управления и обеспечения ядерной и радиационной безопасности | тепловой энергии; безопасность эксплуатации и радиационный контроль атомных объектов и установок; | <i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 24.078, 40.008, 40.011 | установок ;<br>В-ПК-3[1] - владеть методиками испытаний оборудования при его монтаже и наладке |
|---|---|--|--|

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

| Направления/цели воспитания | Задачи воспитания (код)  | Воспитательный потенциал дисциплин   |
|-----------------------------|--|--|
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17) | 1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты. |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения                             | Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие   |

|                             |   |  |
|-----------------------------|---|--|
|                             | (B18)   | <p>посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.</p>   |
| Профессиональное воспитание | <p>Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)</p> | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований.</li> </ul> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</li> </ul> |

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| № п.п | Наименование раздела учебной дисциплины   | Недели | Лекции/ Практик. (семинары )/ Лабораторные работы, час. | Обязат. текущий контроль (форма*, неделя) | Максимальный балл за раздел** | Аттестация раздела (форма*, неделя) | Индикаторы освоения компетенции  |
|-------|---|--------|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|
|       | <i>5 Семестр</i>  |        |   |   |                               |                                     |  |
| 1     | Основные понятия и исходные положения. Основные законы и уравнения термодинамики.   | 1-8    | 16/8/8  |   | 25                            | СК-8                                | 3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ОПК-5, У-ОПК-5, В-ОПК-5, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3 |
| 2     | Циклы энергетических установок. Обратимые и необратимые термодинамические процессы. | 9-15   | 16/8/8  |   | 25                            | СК-15                               | 3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-   |

|  |   |  |          |  |    |   |  |
|--|---|--|----------|--|----|---|--|
|  |   |  |          |  |    |   | ОПК-1,<br>3-ОПК-5,<br>У-ОПК-5,<br>В-ОПК-5,<br>3-ПК-1,<br>У-ПК-1,<br>В-ПК-1,<br>3-ПК-2,<br>У-ПК-2,<br>В-ПК-2,<br>3-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3 |
|  | <i>Итого за 5 Семестр</i>                   |  | 32/16/16 |  | 50 |   |  |
|  | <b>Контрольные мероприятия за 5 Семестр</b> |  |          |  | 50 | 3 | 3-ОПК-1,<br>У-ОПК-1,<br>У-ПК-2,<br>В-ПК-2,<br>В-ОПК-1,<br>3-ОПК-5,<br>У-ОПК-5,<br>В-ОПК-5,   |



|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  | 3-ПК-1,<br>У-ПК-1,<br>В-ПК-1,<br>3-ПК-2,<br>3-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3 |
|--|--|--|--|--|--|--|--|

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование  |
|-------------|----------------------|
| СК          | Семестровый контроль |
| З           | Зачет                |

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание   | Лек., час.             | Пр./сем., час. | Лаб., час. |
|------------|---|------------------------|----------------|------------|
|            | <i>5 Семестр</i>  | 32                     | 16             | 16         |
| <b>1-8</b> | <b>Основные понятия и исходные положения. Основные законы и уравнения термодинамики.</b>  | 16                     | 8              | 8          |
| 1          | <b>Введение.</b><br>История развития термодинамики. Задачи термодинамики.<br>Современные проблемы термодинамики   | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |   | 3                      | 2              | 2          |
|            |   | Онлайн                 |                |            |
|            |   | 0                      | 0              | 0          |
| 2          | <b>Основные понятия и исходные положения.</b><br>Термодинамические системы. Термодинамические переменные. Гомогенные и гетерогенные системы.<br>Постулаты термодинамики. Равновесные и неравновесные термодинамические состояния. Параметры состояния.<br>Уравнение состояния. Термодинамические коэффициенты.<br>Основные термодинамические процессы. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс.<br>Политропные процессы. | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |   | 3                      | 2              | 2          |
|            |   | Онлайн                 |                |            |
|            |   | 0                      | 0              | 0          |
| 3          | <b>Основные законы и уравнения термодинамики.</b><br>Первый закон термодинамики. Принцип эквивалентности теплоты и работы. Внутренняя энергия и внешняя работа.<br>Обобщенные силы и обобщенные координаты.<br>Химический потенциал. Второй закон термодинамики.  | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |   | 3                      | 1              | 1          |
|            |   | Онлайн                 |                |            |
|            |   | 0                      | 0              | 0          |

|         |  |                        |   |   |
|---------|--|------------------------|---|---|
|         | Энтропия. Основное уравнение термодинамики. Энтропия и термодинамическая вероятность. Третий закон термодинамики.  |                        |   |   |
| 4 - 5   | <b>Методы термодинамики.</b><br>Метод термодинамических циклов. Метод термодинамических потенциалов. Термодинамические потенциалы сложных систем и систем с переменным числом частиц. Дифференциальные уравнения термодинамики в частных производных. Метод термодинамического подобия. Переход от одной системы термодинамических координат к другой. | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 3                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 6       | <b>Равновесие термодинамических систем.</b><br>Необходимые условия термодинамического равновесия. Устойчивость равновесия. Равновесие в гетерогенной системе. Правило фаз Гиббса. Условия фазового равновесия. Спинодаль и бинодаль. Метастабильные состояния. Критическая точка. Термодинамические флуктуации. Фазовые диаграммы.                     | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 2                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 7 - 8   | <b>Фазовые переходы.</b><br>Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела. Фазовые переходы второго рода. Уравнение Эренфеста. Переход жидкость-пар. Термодинамические параметры парожидкостной системы.                                      | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 2                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 9-15    | <b>Циклы энергетических установок. Обратимые и необратимые термодинамические процессы.</b>   | 16                     | 8 | 8 |
| 9       | <b>Термодинамика потока.</b><br>Система уравнений одномерного течения газа. Критическая скорость истечения. Переход через скорость звука. Сопло Лавала. Потери на трение. Дросселирование. Адиабатическое расширение.  | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 3                      | 2 | 2 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 10      | <b>Эффективность циклов теплосиловых установок.</b><br>Термодинамические циклы энергетических установок. Термический и эффективный к.п.д. Эксергия. Анализ потерь работоспособности. Регенерация теплоты в цикле.  | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 3                      | 2 | 2 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 11      | <b>Циклы энергетических установок.</b><br>Циклы паросиловых установок с насыщенным и перегретым паром. Влияние параметров цикла на к.п.д. паросиловой установки. Газотурбинные циклы с адиабатным и изотермическим сжатием. Бинарные циклы. Парогазовые циклы. Циклы ядерных энергетических установок.   | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 3                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 12      | <b>Обратимые и необратимые термодинамические процессы.</b><br>Причины необратимости. Релаксация в термодинамической системе. Квазиравновесный процесс. Принцип локального термодинамического равновесия. Термодинамические флуктуации.   | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 3                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |
| 13 - 14 | <b>Линейная неравновесная термодинамика.</b><br>Линейные феноменологические законы. Термодинамические потоки и силы. Соотношения   | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 2                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |

|         |  |                        |   |   |
|---------|--|------------------------|---|---|
|         | взаимности Онсагера. Стационарные процессы переноса. Диффузия, теплопроводность. Перекрестные явления переноса. Термоэлектрические явления и термодиффузия.  | 0                      | 0 | 0 |
| 15 - 16 | <b>Основы линейной неравновесной термодинамики.</b><br>Системы, далекие от равновесия. Критерий эволюции Глендсдорфа – Пригожина. Пространственные диссипативные структуры. Ячейки Бенара. Временные и пространственно – временные диссипативные структуры. Экологические системы. Реакция Белоусова – Жаботинского. | Всего аудиторных часов |   |   |
|         |  | 2                      | 1 | 1 |
|         |  | Онлайн                 |   |   |
|         |  | 0                      | 0 | 0 |

Сокращенные наименования онлайн опций:

| Обозначение | Полное наименование              |
|-------------|----------------------------------|
| ЭК          | Электронный курс                 |
| ПМ          | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ          | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ          | Видео-материалы                  |
| АМ          | Аудио-материалы                  |
| Прз         | Презентации                      |
| Т           | Тесты                            |
| ЭСМ         | Электронные справочные материалы |
| ИС          | Интерактивный сайт               |

#### ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

| Недели  | Темы занятий / Содержание   |
|---------|---|
|         | <i>5 Семестр</i>  |
| 1 - 2   | <b>Работа 1. Исследование двухфазного состояния воды.</b><br>Работа 1. Исследование двухфазного состояния воды.   |
| 3 - 4   | <b>Работа 1. Исследование двухфазного состояния воды.</b><br>Работа 1. Исследование двухфазного состояния воды.   |
| 5 - 6   | <b>Работа 3. Исследование теплоемкости газов.</b><br>Работа 3. Исследование теплоемкости газов.   |
| 7 - 8   | <b>Работа 4. Определение коэффициента адиабатической сжимаемости жидкости.</b><br>Работа 4. Определение коэффициента адиабатической сжимаемости жидкости. |
| 9 - 10  | <b>Работа 5. Термодинамика газового потока.</b><br>Работа 5. Термодинамика газового потока.   |
| 11 - 12 | <b>Работа 6. Неравновесные термоэлектрические эффекты.</b><br>Работа 6. Неравновесные термоэлектрические эффекты.   |
| 13 - 14 | <b>Работа 7. Производство энтропии при неравновесном теплообмене.*</b><br>Работа 7. Производство энтропии при неравновесном теплообмене.*                 |
| 15 - 16 | <b>Работа 8. Уравнение состояния.</b><br>Работа 8. Уравнение состояния.   |

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

| Недели  | Темы занятий / Содержание  |
|---------|--|
|         | <i>5 Семестр</i>   |
| 1 - 2   | <b>Исходные понятия и основные законы термодинамики.</b><br>Термодинамические коэффициенты. Первый, второй и третий законы термодинамики. Основное уравнение термодинамики. Уравнение состояния.             |
| 3 - 4   | <b>Методы термодинамики.</b><br>Метод циклов. Метод термодинамических потенциалов. Соотношения Максвелла. Переход от одной системы термодинамических координат к другой. Метод термодинамического подобия.   |
| 5 - 6   | <b>Термодинамическое равновесие.</b><br>Необходимое условие термодинамического равновесия. Устойчивость равновесия. Фазовое равновесие. Фазовые диаграммы.   |
| 7 - 8   | <b>Фазовые переходы.</b><br>Фазовые переходы первого рода. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела. Фазовые переходы второго рода   |
| 9 - 10  | <b>Процессы в газе, влажном и перегретом паре.</b><br>Термодинамика идеального и реального газов. Эффект Джоуля – Томпсона. Изэнтропное расширение газа. Термодинамические параметры парожидкостной системы. |
| 11 - 12 | <b>Термодинамика потока.</b><br>Система уравнений термодинамического состояния движущегося газа. Потери энергии на трение. Критическая скорость истечения. Сопло Лавалья.                                    |
| 13 - 14 | <b>Циклы энергетических установок</b><br>Термический и эффективный КПД цикла. Регенерация теплоты в цикле. Паросиловые и газовые циклы   |
| 15 - 16 | <b>Неравновесная термодинамика.</b><br>Основные понятия и определения. Процессы переноса. Диссипативные структуры.   |

## ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

| Недели | Темы занятий / Содержание   |
|--------|---|
|        | <i>5 Семестр</i>  |
| 1      | <b>Введение.</b><br>История развития термодинамики. Задачи термодинамики. Современные проблемы термодинамики  |
| 2      | <b>Основные понятия и исходные положения.</b><br>Термодинамические системы. Термодинамические переменные. Гомогенные и гетерогенные системы. Постулаты термодинамики. Равновесные и неравновесные термодинамические состояния. Параметры состояния. Уравнение состояния. Термодинамические коэффициенты. Основные термодинамические процессы. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Политропные процессы. |

|       |   |
|-------|---|
| 3     | <p><b>Основные законы и уравнения термодинамики.</b><br/> Первый закон термодинамики. Принцип эквивалентности теплоты и работы. Внутренняя энергия и внешняя работа. Обобщенные силы и обобщенные координаты.<br/> Химический потенциал. Второй закон термодинамики.<br/> Энтропия. Основное уравнение термодинамики. Энтропия и термодинамическая вероятность. Третий закон термодинамики.</p> |
| 4 - 5 | <p><b>Методы термодинамики.</b><br/> Метод термодинамических циклов. Метод термодинамических потенциалов. Термодинамические потенциалы сложных систем и систем с переменным числом частиц. Дифференциальные уравнения термодинамики в частных производных. Метод термодинамического подобия. Переход от одной системы термодинамических координат к другой.</p>                                 |
| 6     | <p><b>Равновесие термодинамических систем.</b><br/> Необходимые условия термодинамического равновесия. Устойчивость равновесия. Равновесие в гетерогенной системе. Правило фаз Гиббса. Условия фазового равновесия. Спинодаль и бинодаль. Метастабильные состояния. Критическая точка. Термодинамические флуктуации. Фазовые диаграммы.</p>   |
| 7 - 8 | <p><b>Фазовые переходы.</b><br/> Классификация фазовых переходов. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела. Фазовые переходы второго рода. Уравнение Эренфеста. Переход жидкость-пар. Термодинамические параметры парожидкостной системы.</p>  |
| 9     | <p><b>Термодинамика потока.</b><br/> Система уравнений одномерного течения газа. Критическая скорость истечения. Переход через скорость звука. Сопло Лавалья. Потери на трение. Дросселирование. Адиабатическое расширение.</p>   |
| 10    | <p><b>Эффективность циклов теплосиловых установок.</b><br/> Термодинамические циклы энергетических установок. Термический и эффективный к.п.д. Эксергия. Анализ потерь работоспособности. Регенерация теплоты в цикле.</p>  |
| 11    | <p><b>Циклы энергетических установок.</b><br/> Циклы паросиловых установок с насыщенным и перегретым паром. Влияние параметров цикла на к.п.д. паросиловой установки. Газотурбинные циклы с адиабатным и изотермическим сжатием. Бинарные циклы. Парогазовые циклы. Циклы ядерных энергетических установок.</p>   |
| 12    | <p><b>Обратимые и необратимые термодинамические процессы.</b><br/> Причины необратимости. Релаксация в термодинамической системе. Квазиравновесный процесс. Принцип локального термодинамического равновесия. Термодинамические флуктуации.</p>   |

|         |   |
|---------|---|
| 13 - 14 | <b>Линейная неравновесная термодинамика.</b><br>Линейные феноменологические законы.<br>Термодинамические потоки и силы. Соотношения взаимности Онсагера. Стационарные процессы переноса. Диффузия, теплопроводность. Перекрестные явления переноса. Термоэлектрические явления и термодиффузия.                     |
| 15 - 16 | <b>Основы линейной неравновесной термодинамики.</b><br>Системы, далекие от равновесия. Критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина. Пространственные диссипативные структуры. Ячейки Бенара. Временные и пространственно – временные диссипативные структуры. Экологические системы. Реакция Белоусова – Жаботинского. |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ОПК-1       | З-ОПК-1             | З, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ОПК-1             | З, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ОПК-1             | З, СК-8, СК-15                    |
| ОПК-5       | З-ОПК-5             | З, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ОПК-5             | З, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ОПК-5             | З, СК-8, СК-15                    |
| ПК-1        | З-ПК-1              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-1              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-1              | З, СК-8, СК-15                    |
| ПК-2        | З-ПК-2              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-2              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-2              | З, СК-8, СК-15                    |
| ПК-3        | З-ПК-3              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | У-ПК-3              | З, СК-8, СК-15                    |
|             | В-ПК-3              | З, СК-8, СК-15                    |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-ех балльной шкале    | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины   |
|--------------|----------------------------------|-------------|---|
| 90-100       | 5 – <i>«отлично»</i>             | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.                                     |
| 85-89        | 4 – <i>«хорошо»</i>              | B           | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.   |
| 75-84        |                                  | C           |   |
| 70-74        |                                  | D           |   |
| 65-69        | 3 – <i>«удовлетворительно»</i>   | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.  |
| 60-64        |                                  |             |   |
| Ниже 60      | 2 – <i>«неудовлетворительно»</i> | F           | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- 53 Б81 Курс общей физики Кн. 3 Термодинамика. Статистическая физика. Строение вещества, Москва: Юрайт, 2013
- ЭИ Л 69 Примеры и задачи по тепломассообмену : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022

3. ЭИ К84 Руководство по технической термодинамике с примерами и задачами : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
4. 536 К84 Руководство по технической термодинамике с примерами и задачами : учебное пособие для вузов, А. Б. Круглов, И. С. Радовский, В. С. Харитонов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 С34 Общий курс физики Т.2 Термодинамика и молекулярная физика, Москва: Физматлит, 2011
2. 621.039 Ф50 Физико-технические основы современной ядерной энергетики. Перспективы и экологические аспекты : учебное пособие, Долгопрудный: Интеллект, 2014
3. 536 К59 Краткое руководство по термодинамике Ч.1 Равновесная термодинамика, , М.: МИФИ, 1991
4. 52 С28 Теория орбит : ограниченная задача трех тел, , : Наука, 1982
5. 621.3 Т34 Теплоэнергетика и теплотехника Кн.3 Тепловые и атомные электростанции, , Москва: МЭИ, 2007
6. 621 А46 Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : справочник. Таблицы рассчитаны по уравнениям Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара и рекомендованы Государственной службой стандартных справочных данных ГСССД Р-776-98, А. А. Александров, Б. А. Григорьев, Москва: МЭИ, 2006
7. 621 П18 Паровые и газовые турбины для электростанций : учебник для вузов, А. Г. Костюк [и др.], Москва: МЭИ, 2008
8. 621.38 Л12 Лабораторный практикум по курсу "Физика микроэлектронных структур" : , Абрамов В.В., Беляков В.В., Першенков В.С., Швецов-Шиловский И.Н., Москва: МИФИ, 1994
9. 621.1 К43 Техническая термодинамика : учебник для вузов, В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин, Москва: МЭИ, 2008
10. 536 Н73 Термодинамика : учебное пособие, И. И. Новиков, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2009
11. 536 П75 Современная термодинамика : от тепловых двигателей до диссипативных структур, И. Пригожин, Д. Кондепуди, Москва: Мир, 2002
12. 536 Б17 Термодинамика : Учеб. пособие для вузов, И.П. Базаров, М.: Высш. школа, 1976
13. 621.3 К44 Термический КПД паротурбинных установок : Учеб. пособие, Киселев Н.П., Радовский И.С., М.: МИФИ, 1992
14. 536 Л12 Лабораторный практикум по термодинамике : учебное пособие для вузов, Л. С. Кокорев [и др.], Москва: МИФИ, 2008



15. 536 К59 Сборник задач по равновесной термодинамике : Учеб. пособие, Л. С. Кокорев, В. П. Соболев, Москва: МИФИ, 1991

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При составлении программы учебной дисциплин предполагалось, что студент знаком с содержанием основных разделов курсов «Высшей математики» и «Общей физики», приобрел начальную практику выполнения и обработки результатов экспериментальных работ в учебных физических лабораториях.

В результате освоения данной дисциплины студент должен знать основные понятия, методы, законы и уравнения термодинамики, а также их основные следствия применительно к различным термодинамическим системам, включая ядерные энергетические установки.

Должен научиться использовать методы термодинамики применительно к исследованию равновесия и устойчивости однородных и многофазных систем, реальных газов, жидкостей и их потоков, циклов преобразования энергии.

Программой курса предусмотрено, что студент должен продемонстрировать результаты освоения методов термодинамики в рамках самостоятельной работы при выполнении домашних заданий, анализе результатов лабораторных работ, а также в последующей учебной практике при расчетном анализе термодинамической эффективности энергетических установок.

Типичные задачи для семинарских занятий с методическими указаниями для их решения представлены в учебном пособии: Кокорев Л.С., Соболев В.П. Сборник задач по равновесной термодинамике: Учебное пособие. – М.: МИФИ. 1991.

Самостоятельная работа студентов включает решение задач.

Для выполнения расчетов студентам рекомендуется воспользоваться прикладными математическими пакетами символьной математики, например Mathcad, Mathematica.

### **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Лекционный курс строится по следующему плану: сначала вводятся и обсуждаются основные понятия и исходные положения термодинамики, излагаются основные законы и уравнения. Потом рассматриваются методы термодинамики, с помощью которых разбираются важнейшие энергетические приложения термодинамики: свойства рабочих тел, процессы

течения газов и жидкостей, циклы преобразования энергии в энергетических установках, в том числе в ядерных.

С целью выработки профессиональных компетенций студентов на лекциях и семинарских занятиях используется интерактивная форма проведения лекционных и семинарских занятий. Активная форма проведения лекционных занятий предполагает, в частности, что студенты углубленно изучают по рекомендуемой преподавателем литературе те разделы лекционного курса, которые не рассматриваются детально на лекциях, но необходимы для дальнейшего изучения курса.

При выполнении расчетных работ по циклам паротурбинных энергетических установок предусмотрено использование программы WaterSteamPro. Расчеты сопла Лавала желательно проводить с использованием математических пакетов символьной математики, например Mathcad, Mathematica.

Самостоятельная работа студентов включает решение задач.

Автор(ы):

Круглов Александр Борисович, к.ф.-м.н.

Харитонов Владимир Степанович, к.т.н., с.н.с.

Рецензент(ы):

доцент Куценко К.В., доцент Корсун А.С.