

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям

  
О.Д. Здрок  
«30» \_\_\_\_\_ 2020г.

Регистрационный № УД-8777/уч.

*Техническая термодинамика ядерных энергетических установок*

---

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 04 06 Ядерные физика и технологии

2020г.

---

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:**

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 06-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 г. № 88 и учебных планов G31-229/уч., G31и-230/уч. от 20.03.2019 г.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

Н.С. КОНЕВА – доцент кафедры энергофизики физического факультета Белорусского государственного университета, кандидат технических наук

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

В. Г. БАШТОВОЙ – профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета, доктор физико-математических наук;

И.А. СОЛОДУХИН – доцент кафедры общей физики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 11 от 21.05.2020 г.);

Научно-методическим Советом БГУ  
(протокол № 5 от 17.06.2020)

Заведующий кафедрой ядерной физики  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ А.И.Тимошенко

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок» разработана для специализации 1-31 04 06 03 «Физика ядерных реакторов и атомных энергетических установок» специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» первой ступени высшего образования.

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

**Цель** учебной дисциплины – сформировать у обучающихся систематические знания в области технической термодинамики применительно к ядерным энергетическим установкам. В том числе она предназначена для более глубокого изучения студентами физических основ процессов преобразования энергии на АЭС.

#### **Задачи учебной дисциплины:**

1. Формирование и закрепление базовых навыков анализа термодинамических циклов ядерных энергетических установок;
2. Формирование у обучающихся представлений о круге вопросов, относящихся к предмету технической термодинамики.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием. Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования.

**Связи** с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Учебная дисциплина основана на знаниях и представлениях, изложенных в общих курсах «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм, «Оптика», и представлениях, заложенных в дисциплине цикла общенаучных и общепрофессиональных дисциплин «Термодинамика и статистическая физика». Учебный материал дисциплины будет использован при преподавании дисциплины специализации «Оборудование АЭС с ВВЭР».

### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций:

#### **академические компетенции:**

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью). АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.

АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни

**социально-личностные компетенции:**

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

**профессиональные компетенции:**

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ ядерной физики и ядерных технологий, ядерно-физических методов исследования, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики.

ПК-3. Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

ПК-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-12. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

ПК-14. Оценивать конкурентоспособность и экономическую эффективность разрабатываемых технологий.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

физические основы технологий превращения теплоты в работу;

основные законы термодинамики;

циклы паросиловых установок, компрессорных и холодильных машин;

**уметь:**

самостоятельно решать задачи, связанные с получением, преобразованием и использованием теплоты в энергетических установках;

оценивать эффективность энергетических установок и машин;  
разрабатывать математические модели теплоэнергетических процессов и устройств;

объяснять физические принципы действия теплоэнергетических установок;

**владеть:**

навыками применения термодинамических подходов к решению прикладных задач;

навыками математического моделирования теплоэнергетических процессов и устройств.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 8 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 92 часа, в том числе 40 аудиторных часов, из них: лекции – 32 часов, управляемая самостоятельная работа – 8 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 2,5 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – экзамен.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

**Тема 1. Энергетическая проблема. ТЭС и АЭС.** Энергетическая проблема. Мировые запасы ТЭР. Экологическая проблема энергетики. Типы электростанций. Графики нагрузок ТЭС.

**Тема 2. Исходные положения термодинамики.** Основные понятия термодинамики. Исходные положения (постулаты) термодинамики. Энергия термодинамической системы, работа, теплота. Термические и калорическое уравнения состояния.

**Тема 3. Первое начало термодинамики.** Первое начало термодинамики. Вечный двигатель первого рода. Теплоемкость, энтальпия, закон Гесса. Уравнения Кирхгофа. Уравнение теплопроводности.

**Тема 4. Второе начало термодинамики.** Второе начало термодинамики. Вечный двигатель второго рода. Формулировки второго начала термодинамики Томсона-Планка и Клаузиуса. Обратимые и необратимые процессы. Принцип Каратеодори. Энтропия. Абсолютная термодинамическая температура. Второе начало термодинамики для равновесных процессов. Равенство Клаузиуса. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Цикл и теоремы Карно. Принцип динамического отопления. Обратный обратимый цикл Карно. Обобщенный термодинамический цикл Карно. Регенерация теплоты. Физический смысл энтропии. Уравнение Гюи-Стодолы. Эксергия теплоты, рабочего тела, потока рабочего тела. Влияние необратимости на работу реальных процессов.

**Тема 5. Фазовые переходы.** Гомогенные и гетерогенные системы. Фазы и компоненты. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы. Фазовые переходы. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка. Условия устойчивости критического состояния. Закон соответствующих состояний. Термодинамически подобные вещества. Поверхностное натяжение. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы с учетом поверхностного натяжения. Критический радиус зародыша.

**Тема 6. Термодинамика газового потока.** Уравнение энергии газового потока. Располагаемая работа газового потока. Основные закономерности соплового и диффузорного адиабатного течения газа. Истечение идеального газа из суживающихся сопел. Истечение идеального газа из комбинированного сопла Лавалья. Расчет истечения реальных газов и паров. Адиабатное дросселирование. Дроссельный эффект (эффект Джоуля-Томсона).

**Тема 7. Циклы компрессорных машин.** Одноступенчатый компрессор. Мощность привода и коэффициенты полезного действия компрессора. Многоступенчатый компрессор.

**Тема 8. Циклы паросиловых установок.** Цикл Карно во влажном паре и его недостатки. Основной цикл ПСУ - цикл Ренкина. Полезная работа цикла Ренкина. Работа питательного насоса. Термический к.п.д. цикла Ренкина. Влияние параметров пара на термический кпд цикла Ренкина. Промежуточный перегрев пара. Регенеративный цикл паросиловой установки. Бинарные (двойные) циклы. Циклы атомных электростанций.

**Тема 9. Циклы холодильных машин.** Цикл воздушной холодильной установки. Цикл паровой компрессорной холодильной установки. Цикл холодильной установки абсорбционного типа. Цикл парожетторной холодильной установки. Тепловой насос. Вихревая труба. Термотрансформаторы.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Энергетическая проблема. ТЭС и АЭС	2						Устный опрос
2	Исходные положения термодинамики	2					2	Устный опрос Письменное тестирование (по темам 1- 2)
3	Первое начало термодинамики	4						Письменное тестирование
4	Второе начало термодинамики.	4					2	Устный опрос Письменное тестирование (по темам 3- 4)
5	Фазовые переходы	4						Письменное тестирование
6	Термодинамика газового потока	4						Устный опрос
7	Циклы компрессорных машин.	4					2	Письменное тестирование
8	Циклы паросиловых установок.	4						Устный опрос. Защита рефератов по теме 8
9	Циклы холодильных машин.	4					2	Устный опрос. Защита рефератов по теме 9

## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Перечень основной литературы**

1. Стерман Л.С., Тевлин С.А., Шарков А.Т. Тепловые и атомные электростанции. М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.
2. Базаров И.П. Термодинамика. СПб: Изд-во «Лань», 2010. – 384 с.
3. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. М.: Химия, 1970. – 440 с.
4. Микрюков В.Е. Курс термодинамики. М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1960. – 236 с.
5. Литвин А.М. Техническая термодинамика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 312 с.
6. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Изд-во «Юрайт», 2013. – 566 с.
7. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: «Высшая школа», 1979. – 446 с.
8. РБ-132-17 «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик, работающих под давлением оборудования и трубопроводов атомных станций». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.09.2017 № 379.
9. РБ-133-17 «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик насосов атомных станций». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.09.2017 № 396.

### **Перечень дополнительной литературы**

1. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. М.: «Высшая школа», 1981. – 536 с.
2. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. – 304 с.
3. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964. – 456 с.
4. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. М.: Едиториал УРСС, 2002. — В 3-х томах.

### **Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине рекомендуется использовать тестовые задания по разделам учебной дисциплины, контрольные работы, защиту реферативных работ. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической

картой учебной дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Тестирование проводится в письменной форме. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка каждого из тестов проводится по десятибалльной шкале. Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией.

Контрольная работа проводится в письменной форме. На ее выполнение отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка проводится по десятибалльной шкале.

Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за письменное тестирование, контрольные работы и оценки за защиту реферата.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена.

Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по учебной дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,3; для экзаменационной оценки — 0,7.

Итоговая оценка формируется на основе:

1. Правил проведения аттестации студентов (Постановление Министерства образования Республики Беларусь № 53 от 29 мая 2012 г.);
2. Положения о рейтинговой системе оценки знаний по дисциплине в БГУ (Приказ ректора БГУ от № 189-ОД от 31.03.2020
3. Критериев оценки знаний студентов (письмо Министерства образования от 22.12.2003 г.)

### **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

Тема 1. Энергетическая проблема. ТЭС и АЭС. Самостоятельное изучение современных проблема энергетики применительно к АЭС.

Тема 2. Исходные положения термодинамики. Самостоятельное изучение современных методов определения состояния реального газа.

Форма контроля – письменное тестирование.

Тема 4. Второе начало термодинамики. Самостоятельное изучение основных методов регенерации теплоты применительно к термодинамическим циклам. Форма контроля – письменное тестирование.

Тема 7. Циклы компрессорных машин. Подготовить и защитить реферативную работу по заданной теме. Форма контроля – защита реферативных работ (доклад с электронной презентацией).

Тема 9. Циклы холодильных машин. Подготовить и защитить реферативную работу по заданной теме.

Форма контроля – защита реферативных работ (доклад с электронной презентацией).

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

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;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

При организации образовательного процесса используются **методы и приемы развития критического мышления**, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией в процессе чтения и письма; понимания информации как отправного, а не конечного пункта критического мышления.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

В случае необходимости, освоение части лекционного по отдельным темам и в объеме, определяемым решением кафедры, может быть организовано с использованием информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и привлечением электронных средств обучения. Организация занятий с привлечением электронных средств обучения ведется с помощью образовательного портала Физического факультета БГУ [eduphys.bsu.by](http://eduphys.bsu.by), который реализован на основе программного обеспечения LMS Moodle. На портале в рамках онлайн-курса «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок» размещаются конспекты лекций, а также приводятся электронные учебные материалы, рекомендуемые при изучении соответствующих тем. Для каждой лекции даются ссылки на страницы в рекомендуемой литературе. Самостоятельная

работа студентов сопровождается консультациями лектора по изучаемому самостоятельно материалу и выполнению ряда заданий в очной форме либо в режиме онлайн.

Контроль за усвоением студентами учебного материала на лекциях проводится путем письменных и устных экспресс-опросов по конкретным темам курса. Для текущего контроля качества усвоения знаний по разделам курса в процессе контролируемой самостоятельной работы по дисциплине организуется проведение текущего контроля по каждой теме с помощью вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение, с предоставлением в письменном виде выполненных заданий, рекомендуется использовать письменные тестирования, а также презентации, подготовленные к защита реферативных работ. По результатам сдачи выполненных заданий преподаватель выставляет отметку (по десятибалльной шкале), которая включается при расчете текущей успеваемости как среднее арифметическое отметок.

### **Темы реферативных работ**

1. Одноступенчатый компрессор.
2. Мощность привода и коэффициенты полезного действия компрессора.
3. Многоступенчатый компрессор.
4. Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара.
5. Регенеративный цикл паросиловой установки.
6. Циклы атомных электростанций.
7. Цикл воздушной холодильной установки.
8. Цикл паровой компрессорной холодильной установки.
9. Цикл холодильной установки абсорбционного типа.
10. Цикл парожетторной холодильной установки.
11. Тепловой насос.
12. Вихревая труба.
13. Термотрансформаторы.

### **Примеры тестовых заданий**

1. а) Что называется критической точкой? б) Дайте определение термодинамически подобных веществ? в) В чем заключается суть условий устойчивости критического состояния? г) сформулируйте закон соответствующих состояний
2. а) Что называется термином энтропия, б) Что такое абсолютная термодинамическая температура в) Сформулируйте второе начало термодинамики для равновесных процессов г) Сформулируйте второе начало термодинамики для неравновесных процессов?

## Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Экологическая проблема атомной энергетики.
2. Энергия термодинамической системы, работа, теплота.
3. Термические и калорическое уравнения состояния.
4. Закон Гесса.
5. Уравнение теплопроводности.
6. Принцип Каратеодори.
7. Абсолютная термодинамическая температура.
8. Обратимые и необратимые процессы.
9. Второе начало термодинамики для равновесных процессов.
10. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов.
11. Физический смысл энтропии.
12. Цикл и теоремы Карно.
13. Обобщенный термодинамический цикл Карно.
14. Эксергия теплоты, рабочего тела, потока рабочего тела.
15. Влияние необратимости на работу реальных процессов.
16. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы.
17. Правило фаз Гиббса.
18. Фазовые переходы первого рода.
19. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
20. Условия устойчивости критического состояния.
21. Закон соответствующих состояний.
22. Термодинамически подобные веществ.
23. Поверхностное натяжение.
24. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы с учетом поверхностного натяжения.
25. Критический радиус зародыша.
26. Уравнение энергии газового потока.
27. Располагаемая работа газового потока.
28. Основные закономерности соплового и диффузорного адиабатного течения газа.
29. Истечение идеального газа из суживающихся сопел.
30. Истечение идеального газа из комбинированного сопла Лавалья.
31. Расчет истечения реальных газов и паров.
32. Адиабатное дросселирование. Дроссельный эффект (эффект Джоуля-Томсона).

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Термогидродинамика переходных и аварийных режимов реакторных установок	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО  
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры ядерной физики (протокол № \_\_ от \_\_\_\_\_.202\_ г.)

Заведующий кафедрой  
ядерной физики  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ А.И.Тимощенко

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ М.С.Тиванов