

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Луганский государственный университет  
имени Владимира Даля»  
(ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В.Даля»)**

**Северодонецкий технологический институт (филиал)**

**Кафедра управления инновациями в промышленности**

**УТВЕРЖДАЮ:**  
Врио. директора СТИ (филиал)  
ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»  
Ю.В. Бородач  
(подпись)  
« 26 » 09 2025 года



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Котельные и турбинные установки»**

По направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

профиль «Управление и автоматизация инновационными технологиями в топливно-энергетическом комплексе»

**Северодонецк - 2025**

## Лист согласования РПУД

Рабочая программа учебной дисциплины «Котельные и турбинные установки» по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Управление и автоматизация инновационными технологиями в топливно-энергетическом комплексе» –29 с.

Рабочая программа учебной дисциплины «Котельные и турбинные установки» разработана в соответствии с ФГОС ВО, утвержденным приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 09.08.2021 № 730 (с изменениями и дополнениями).

СОСТАВИТЕЛЬ:

Доцент, к.т.н. Ткачев Р.Ю.

Рабочая программа дисциплины утверждена на заседании кафедры управления инновациями в промышленности « 02 » « 09 » 2025 г., протокол № 1.

Заведующий кафедрой

управления инновациями в промышленности



Е.А. Бойко

Переутверждена: «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г., протокол № \_\_\_\_\_.

Рекомендована на заседании учебно-методической комиссии Северодонецкого технологического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» «16» 09 2025 г., протокол № 1.

Председатель учебно-методической комиссии  
СТИ (филиал) ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»



Ю.В. Бородач

© Ткачев Р.Ю, 2025 год

© СТИ (филиал) ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 2025 год

## 1. Цели освоения дисциплины

Цели освоения дисциплины в области обучения, воспитания и развития, соответствующие целям ООП:

- подготовка выпускников к проектно-конструкторской и производственно-технологической деятельности в области теплоэнергетики, современных технологий производства электрической и тепловой энергии;
- подготовка выпускников к эксплуатации и обслуживанию установок и оборудования современного производства электрической и тепловой энергии с высокой эффективностью, выполнением требований защиты окружающей среды и правил безопасности производства.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина относится к циклу дисциплин направления бакалаврской подготовки.

Основывается на базе дисциплин: «Технологические процессы автоматизированного производства».

\_\_\_\_\_ : «  
технологических процессов энергетической отрасли».

Требования к уровню подготовки к успешному освоению дисциплины:

входные знания

- фундаментальных математических, естественнонаучных, социально-экономических и инженерных принципов, лежащих в основе профессиональной деятельности;
- законов сохранения и превращения энергии применительно к системам передачи и трансформации теплоты;
- калорических и переносных свойств веществ применительно к рабочим телам тепловых машин и теплоносителям;
- термодинамических процессов и циклов преобразования энергии, протекающие в теплотехнических установках;
- законов и основных физико-математических моделей переноса теплоты и массы применительно к теплотехническим и теплотехнологическим установкам и системам;
- интеллектуальных технологий инженерного анализа;
- основ методики технико-экономических расчетов теплоэнергетических объектов;
- номенклатуры технических материалов в теплоэнергетике, их структуры и основных свойств, атомно-кристаллического строения металлов, фазово-структурного состава сплавов, типовых диаграмм состояния, свойств железа и сплавов на его основе;
- основных законов механики, видов механизмов, их классификацию и области применения;

- технологических схем производства электрической и тепловой энергии;
- общих законов и уравнений статики, кинематики и динамики жидкостей и газов;

#### входные умения

- рассчитывать передаваемые тепловые потоки;
- составлять алгоритмы и программы расчета оптимальных параметров паротурбинных установок на ПЭВМ;
- выполнять системное описание объекта анализа;
- определять параметры термодинамических циклов и показатели их тепловой экономичности;
- проводить гидравлический расчет трубопроводов;

#### входной опыт

- интерпретации физического смысла результатов исследований;
- термодинамического анализа циклов тепловых машин с целью их оптимизации;
- гидравлического расчета трубопроводов;
- теплогидравлического расчета теплообменных аппаратов;
- проектирования котлов ТЭС.

### **3. Результаты освоения дисциплины**

После изучения данной дисциплины обучающиеся приобретают знания, умения и опыт, соответствующие результатам основной образовательной программы: А/6, В/6, С/7. Соответствие результатов освоения дисциплины «Турбины тепловых и атомных электрических станций» формируемым компетенциям ОПОП представлено в таблице.

<b>Формируемые компетенции в соответствии с ОПОП*</b>	<b>Результаты освоения дисциплины</b>
А/01.6 А/02.6	<div> <div> <div>,</div> <div>0</div> <div>2</div> <div>0</div> <div>0</div> </div> <div> <div>.</div> <div>.</div> <div>1</div> <div>01</div> <div>01</div> </div> <div> <div>/</div> <div>01</div> <div>1</div> <div>01</div> <div>01</div> </div> <div> <div>0</div> <div>.</div> <div>0</div> <div>.</div> <div>.</div> </div> </div>

В/01.6 В/02.6 В/03.6	3 0 . 0 . - 0 . 0 01 . 0 0 2 . / . . 0 01 управления технологическими процессами 2 . 1 0 01 . 0 0
С/01.7 С/02.7 С/03.7 С/04.7	, . 0 0 0 0 01 . 0 0 7 0 0 01 . 0 0 . 0 1 1 : 0 0 01 . 0 0 0 1 :

В процессе освоения дисциплины у студентов развиваются следующие компетенции.

*1.Общепрофессиональные:*

27-1.2 0 1 1 ,  
 0 1 0 0 . 0 / :  
 27-1.1. 1 1 1 ;  
 27-1.2. 0 1 0 0 . ,0 0  
 / ;  
 27-1.3. 0 0 1 1  
 в профессиональной деятельности;

27-1.4. 0 1 0 1 0 1 0 0 .  
 0 : ;  
 27-1.5. 0 0 0 0 0 .  
 0 / ;  
 27-1.6. 1 0 1 0 1 . 00  
 0 0 .  
 27-7. 0 0 1 . 1 1 0 1  
 . 1 1 . 0 :  
 ОПК-7.1. Знать основы государственного регулирования ресурсосбережения;  
 27-7.2. 0 0 0 1 . 1 1 0 1 .  
 1 1 . ;  
 27-7.3. 0 - .

#### 4. Структура и содержание дисциплины

##### 4.1. Структура дисциплины по разделам, формам организации и контроля обучения

№	Название раздела/темы	Аудиторная работа (час)			СРС (час)	Итого
		Лекции	Практ./семинар	Лаб. зан.		
1	Общие сведения о турбине и турбинной установке	6	2		11	19
2	Тепловой процесс турбинной ступени	14	12	4	27	57
3	Многоступенчатые паровые турбины	12	8	2	23	45
4	Конструкция и расчет на прочность деталей паровых турбин	4		20	8	32
5	Работа турбин при переменных режимах	10	6	5	19	40
6	Турбины для комбинированного производства энергии	5	6		10	21
7	Турбины атомных электростанций	6	4		11	21
8	Основы регулирования паровых турбин	8	2	2	15	27
9	Конденсационные устройства паровых турбин	6	2	2	11	21
10	Газотурбинные установки	4			8	12
11	Курсовой проект		20		40	60
	<b>Итого</b>	<b>75</b>	<b>62</b>	<b>35</b>	<b>183</b>	<b>355</b>

При сдаче отчетов и письменных работ проводится устное собеседование.

## **4.2. Содержание разделов дисциплины**

### **Модуль 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТУРБИНЕ И ТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ**

*Лекции.*

#### **1.1. Введение**

Предмет и задачи курса. Современное состояние теплоэнергетики и перспективы ее развития. Роль паро- и газотурбинных установок в энергетике и других отраслях. История развития турбостроения.

#### **1.2. Принцип действия турбины и ее место в энергетической установке**

Принцип действия турбинного двигателя. Типовые конструкции паровой турбины, ее основные узлы. Принципиальные схемы паро- и газотурбинных энергетических установок ТЭС и АЭС.

Циклы паротурбинных установок. КПД турбины и турбинной установки. Влияние начальных и конечных параметров пара. Промежуточный перегрев пара. Регенеративный подогрев питательной воды. Комбинированная выработка электроэнергии и теплоты.

Понятие мощности: идеальной турбины, внутренней, эффективной, электрической, номинальной и расчетной. Абсолютные и относительные КПД.

Классификация турбин. Условные обозначения турбин.

*Задача*

1. Показатели ПТУ

### **Модуль 2. ТЕПЛОВОЙ ПРОЦЕСС ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ**

*Лекции.*

#### **2.1. Течение рабочего тела в турбинных решетках**

Основные уравнения потока для сжимаемой жидкости: состояния, неразрывности, количества движения, сохранения энергии. Понятие плоскопараллельного и пространственного течения.

Характеристики потока при расширении газа в каналах. Параметры полного торможения. Конфузорное и диффузорное течение потока. Определение выходной скорости при расширении газа в неподвижном канале. Критические параметры и критическая скорость. Критический расход. Приведенный расход. Изменение проходного сечения канала в зависимости от относительного давления. Расширение газа в каналах с потерями располагаемой энергии.

Суживающиеся и расширяющиеся каналы. Формы каналов турбинных решеток. Отклонение потока в косом срезе турбинных решеток. Предельное отклонение в косом срезе.

Геометрические и газодинамические характеристики решеток турбинных профилей. Обтекание потоком одиночного профиля в зависимости от геометрических и режимных параметров. Потери профильные, кромочные, концевые, волновые, от нестационарности потока. Коэффициенты скорости, потери располагаемой энергии, расхода.

#### **2.2. Преобразование энергии в турбинной ступени**

Располагаемые теплоперепады ступени, сопловой и рабочей решеток. Степень реакции ступени. Активные и реактивные ступени. Абсолютные и относительные скорости потока в ступени и их определение. Треугольники скоростей.

Преобразование энергии на рабочих лопатках. Окружное и осевое усилие потока на лопатках. Мощность ступени. Удельная работа. Потери располагаемой энергии в соплах, на рабочих лопатках и с выходной скоростью. Определение выходной относительной скорости потока из вращающегося канала рабочих решеток.

Относительный КПД на лопатках ступени и факторы, его определяющие. Отношение скоростей  $u/c_\phi$  - как критерий экономичности ступени. Оптимальное отношение скоростей. Оптимальный располагаемый теплоперепад ступени.

Изображение процесса расширения газа в  $hs$  - диаграмме для ступени.

### **2.3. Турбины со ступенями скорости**

Назначение турбинных ступеней скорости. Тепловой процесс и КПД турбинной ступени скорости. Оптимальное отношение скоростей  $u/c_\phi$  для турбинной ступени скорости. Определение скоростей на выходе из решеток и потерь располагаемой энергии. Изображение процесса расширения в турбинной ступени скорости в  $hs$  - диаграмме.

### **2.4. Определение размеров турбинных ступеней**

Выбор характеристик ступени. Определение основных геометрических параметров (средний диаметр, выходные высоты, углы выхода потока, тип профиля лопаток, углы установки профиля, величины хорд, относительные и абсолютные шаги лопаток, зазоры и перекрыши и т.п.) Степень парциальности. Расчет решеток при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях.

Использование аэродинамических характеристик решеток при их расчете. Нормали на профили сопловых и рабочих лопатках. Условные обозначения типов профилей.

Особенности расчета ступени с «длинными» лопатками. Понятие «длинных» лопаток. Изменение реактивности по высоте лопатки. Методы профилирования длинных лопаток.

Конструктивное выполнение сопловых и рабочих лопаток. Типы хвостовиков и бандажей.

Изображение процесса расширения пара в  $hs$  - диаграмме для ступени.

### **2.5. Относительный внутренний КПД ступени**

Дополнительные потери ступени. Внутренняя работа потока, относительный внутренний КПД ступени. Дополнительные потери ступени: потери трения диска и лопаточного бандажа; потери, связанные с парциальным подводом пара (на вентиляцию и сегментные); потери от утечек через диафрагменное уплотнение и надбандажный зазор; потери от влажности пара.

Оптимальная степень парциальности ступени.

Назначение уплотнений в турбине и требования к ним. Типы уплотнений. Схема лабиринтового уплотнения. Течение пара через уплотнение. Процесс расширения пара в уплотнении в  $hs$  - диаграмме. Определение протечки пара через лабиринтовое уплотнение.

Изображение процесса расширения пара в  $hs$  - диаграмме для ступени.

Примеры конструктивного выполнения осевых ступеней.

*Лабораторная работа.*

*1. Исследование характеристик турбинной ступени.*

*Задачи.*

*1. Расчет сопла.*

*2. Тепловой расчет ступени.*

*3. Ступени скорости.*

*4. Определение геометрических характеристик ступени*

*5. Закрутка лопаток*

## **Модуль 3. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ**

*Лекции.*



### **3.1. Рабочий процесс многоступенчатой паровой турбины**

Схема устройства активной и реактивной турбины. Понятие регулирующих и не регулируемых ступеней.

Использование потери с выходной скоростью в ступенях. Коэффициент возврата тепла. Потери от дросселирования вне проточной части турбины.

Основные преимущества многоступенчатых турбин.

Эрозия рабочих лопаток и способы борьбы с ней.

Концевые уплотнения турбин. Схема отвода и подвода пара в уплотнении. Типы концевых уплотнений.

### **3.2. Выбор конструкции и расчет многоступенчатых турбин**

Основы выбора конструкции турбин. Деление ступеней конденсационных турбин на группы.

Предельная и единичная максимальная мощность турбины. Способы увеличения предельной мощности. Однопоточные и многопоточные, одновальные и многовальные турбины.

Расчетная мощность турбины. Выбор теплоперепада и типа регулирующей ступени. Предварительная оценка размеров первой и последней нерегулируемых ступеней. Определение числа ступеней и распределение теплоперепада между ними. Особенности расчета ступеней отдельных групп конденсационных турбин.

Приближенная оценка КПД турбоагрегата и отдельных отсеков проточной части турбины.

Выбор частоты вращения, числа валов и цилиндров турбины.

Осевые усилия в турбинах и способы их уравнивания.

Обзор конструкций конденсационных турбин.

*Задачи.*

1. *Расчет многоступенчатой турбины.*

2. *Определение количества ступеней турбины.*

## **Модуль 4. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*Лекции.*

### **4.1. Детали корпуса турбин**

Конструкции корпусов, их материал и расчет. Обоймы. Тепловые расширения. Расчет фланцевого соединения.

Сопловые и направляющие лопатки. Сопловые сегменты. Крепление.

Конструкции и материал диафрагм. Крепление диафрагм. Расчет диафрагм. Диафрагменные уплотнения.

Конструкции концевых уплотнений турбин. Трубопроводы концевых уплотнений.

Системы парораспределения турбин.

Опорные подшипники и их конструкции. Расчет опорного подшипника. Крепление.

Упорные подшипники и их конструкции.

Организация температурных расширений ротора и статора турбины. Относительные удлинения. Фикс-пункт турбины.

### **4.2. Детали ротора турбины**

Конструкции и материал рабочих лопаток. Концевая часть лопаток и бандажи. Хвостовики лопаток. Замковые соединения. Расчет лопаток на прочность. Вибрация лопаток. Отстройка лопаток от опасных вибраций.

Роторы турбин и их конструкции. Крепление деталей на валу. Расчет дисков на прочность. Расчет вала на прочность. Критическая частота вращения ротора. Материалы дисков, валов, цельникованных роторов.

Соединительные муфты.

Валоповоротное устройство.

*Лабораторная работа.*

1. Изучение конструкций паровых турбин.

## **Модуль 5. РАБОТА ТУРБИН ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ**

*Лекции.*

### **5.1. Работа ступени при переменных режимах**

Понятие переменного (нерасчетного) режима. Переменный режим суживающихся и расширяющихся решеток. Сетка относительных расходов. Предельное отношение давлений для расширяющейся решетки. Изменение степени реакции и расхода пара через ступень.

КПД ступени при изменении режима ее работы.

Детальный расчет переменного режима работы ступени. Приближенные методы расчета.

Условия работы регулирующих и последних ступеней турбин при переменном пропуске пара.

### **5.2. Работа многоступенчатой турбины при переменных режимах**

Распределение давлений и теплоперепадов в ступенях турбины при изменении режима работы.

Системы парораспределения турбин: дроссельная, сопловая, обводная, комбинированная. Тепловой процесс турбины при переменном пропуске пара в различных системах парораспределения. Распределение потоков пара между сопловыми сегментами. Изменение давлений пара за регулирующими клапанами и в камере регулирующей ступени при переменных расходах пара.

Выбор системы парораспределения. Регулирование мощности турбины способом скользящего давления.

Диаграмма режимов конденсационной турбины. Расход пара на холостой ход.

### **5.3. Влияние изменений параметров пара на мощность турбины**

Влияние отклонения начального давления пара при разных системах парораспределения. Изменение экономичности и надежности.

Изменение температуры свежего пара и промежуточного перегрева.

Влияние давления отработавшего пара. Универсальная зависимость изменения мощности конденсационной турбины от конечного давления.

Осевые усилия турбины при переменном режиме.

*Задачи.*

1. Переменный режим работы ступени.

2. Переменный режим работы турбины

## **Модуль 6. ТУРБИНЫ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ**

*Лекции.*

Турбины с противодавлением и условия их применения. Связь между противодавлением и нагрузкой турбины. Особенности конструктивного оформления.

Турбины с промежуточными регулирующими отборами пара. Процессы расширения пара в  $h_s$ - диаграмме. Диаграммы режимов. Конструктивное оформление турбин. Поворотные диаграммы.

Турбины с двухступенчатым отопительным отбором пара. Диаграмма режимов.

Конструкции теплофикационных турбин.

## **Модуль 7. ТУРБИНЫ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*Лекции.*

Особенности турбин для атомных электростанций. Сепарация влаги и промежуточный перегрев.

Конструкции турбин.

## **Модуль 8. ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*Лекции.*

### **8.1. Регулирование турбин**

Задачи регулирования турбин. Уравнение моментов турбогенератора. Условие постоянства частоты вращения.

Принципиальные схемы регулирования. Основные элементы систем регулирования. Регуляторы скорости. Золотники. Сервомоторы. Обратная связь. Механизм управления (синхронизатор). Регулирующие клапаны.

Статистическая характеристика регулирования.

Степень неравномерности и нечувствительности. Рациональная форма статической характеристики.

Работа регулирования при параллельном включении генераторов.

Основы статистического проектирования регулирования.

Переходные процессы регулирования турбин.

Особенности регулирования теплофикационных турбин. Поворотные диафрагмы.

Особенности регулирования турбин с промежуточным перегревом.

### **8.2. Защита турбин**

Задачи и виды защит паровых турбин. Защита от повышения скорости вращения. Реле осевого сдвига. Предохранительные и обратные клапаны.

Стопорные и отсеченные клапаны. Сервомоторы клапанов.

### **8.3. Маслоснабжение турбин**

Схемы маслоснабжения турбины и основные требования к ним. Турбинное масло. Элементы систем маслоснабжения. Масляный бак.

## **Модуль 9. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*Лекции.*

Назначение конденсационных устройств. Схема конденсационной установки и ее элементы.

### **9.1. Конденсаторы паровых турбин**

Типы конденсаторов. Конструкция поверхностного конденсатора.

Тепловой процесс в конденсаторе. Количество воздуха, поступающее в конденсатор. Парциальные давления пара и воздуха. Температура конденсата и его переохлаждение. Зоны массовой конденсации и охлаждения. Паровое сопротивление конденсатора.

Общий порядок теплового расчета конденсатора. Тепловой баланс конденсатора. Выбор кратности охлаждения и скорости движения воды в трубках. Расчет поверхности охлаждения, числа ходов воды, числа трубок и их длины, размеров трубной доски.

Принципы рациональной компоновки трубного пучка.

Гидравлическое сопротивление конденсатора. Соединение с выхлопным патрубком турбины.

Построение тепловых характеристик конденсатора при изменении расхода пара, температуры и расхода охлаждающей воды.

### **9.2. Насосы конденсационной установки**

Воздухоотсасывающие устройства. Характеристика пароструйного эжектора.

Конденсатные и циркуляционные насосы.

Конструкции насосов.

*Задачи.*

1. Конденсационная установка.

## Модуль 10. ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ

### 10.1. Схемы и циклы ГТУ

Схемы и циклы ГТУ. Основные показатели, характеризующие ГТУ, и способы повышения их экономичности. Одновальные ГТУ с регенерацией. Сложные и многовальные ГТУ.

Парогазовые установки.

### 10.2. Конструктивное устройство ГТУ

Типы газовых турбин. Конструкции основных деталей газовых турбин. Способы охлаждения деталей.

Камеры сгорания. Теплообменные аппараты. Компрессоры.

Использование ГТУ в энергетике.

### 4.3. Распределение компетенций по разделам дисциплины

Распределение по разделам дисциплины планируемых результатов обучения по основной образовательной программе, формируемых в рамках данной дисциплины и указанных в пункте 3.

Таблица 2.

Распределение по разделам дисциплины планируемых результатов обучения

№	Формируемые компетенции	Разделы дисциплины									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	З.8.2		x			x			x	x	x
2.	З.8.3		x	x			x	x		x	x
3.	З.9.4			x	x		x	x			x
4.	З.12.1	x		x	x						x
5.	З.15.1		x	x	x	x				x	
6.	З.15.2	x		x	x	x				x	
7.	З.16.1	x		x	x		x	x			x
8.	У.7.1		x	x		x				x	x
9.	У.8.1.		x	x	x		x			x	
10.	У.8.2	x									x
11.	У.9.1			x		x	x			x	
12.	У.9.3				x						
13.	У.9.4	x		x			x	x		x	
14.	У.12.1		x	x		x	x	x			x
15.	В.7.1		x					x			x
16.	В.8.1	x		x		x			x		
17.	В.8.2							x	x	x	x
18.	В.8.3			x		x					
19.	В.9.2		x				x		x	x	
20.	В.15.1					x		x			
21.	В.16.1	x		x					x		x

## 5. Образовательные технологии

При освоении дисциплины используются следующие сочетания видов учебной работы с методами и формами активизации познавательной деятельности бакалавров для достижения запланированных результатов обучения и формирования компетенций.

Методы	ФОО	ЛК	ЛБ	ПР	СРС	К. пр.
ИТ-методы		+			+	+
Работа в команде			+		+	+
Case-study						+
Обучение на основе опыта		+	+	+	+	+
Опережающая самостоятельная работа			+	+	+	+
Поисковый метод					+	+
Исследовательский метод		+	+		+	+
Обратная связь		+	+	+		+

## 6. Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

**6.1. Текущая СРС**, направленная на углубление и закрепление знаний студента, развитие практических умений:

- работа с лекционным материалом,
- поиск и обзор литературы и электронных источников информации по индивидуально заданной проблеме курса,
- изучение тем, вынесенных на самостоятельную проработку,
- подготовка к контрольным работам и коллоквиуму, к зачету, экзамену.

**6.2. Творческая проблемно-ориентированная самостоятельная работа (ТСР)**, ориентированная на развитие интеллектуальных умений, комплекса универсальных (общекультурных) и профессиональных компетенций, повышение творческого потенциала студентов:

- поиск, анализ, структурирование и презентация информации,
- исследовательская работа и участие в научных студенческих конференциях, семинарах и олимпиадах;
- анализ научных публикаций по заранее определенной преподавателем теме;
- анализ статистических и фактических материалов по заданной теме, проведение расчетов, составление схем и моделей на основе статистических материалов.

**6.3. Содержание самостоятельной работы студентов по дисциплине**

1. Перечень научных проблем и направлений научных исследований:

- Методы и средства диагностики технического состояния оборудования.
- Расчетные методы определения наработки на отказ тепломеханического оборудования
- Выбор технологии сжигания твердого топлива.
- Перспективные технологии преобразования природной энергии в электрическую энергию.
- Оценка антропогенного влияния на экологическое состояние окружающей среды.
- Теплофизические проблемы совершенствования энергетического оборудования

2. Темы индивидуальных заданий: В качестве индивидуальных заданий студенты решают индивидуальные задачи по разделам курса (примерные перечень задач приведен в п. 7.2)

3. Темы, выносимые на самостоятельную проработку:

- Абразивный износ лопаток паровых турбин.
- Отрыв рабочих лопаток. Причины и способы борьбы.
- Экспресс-методы оценки тепловой экономичности паротурбинных установок.
- Метод коэффициентов изменения мощности. Энергетический и эксергетический методы анализа эффективности паротурбинных КЭС, ТЭЦ, газотурбинных и парогазовых электростанций.
- Анализ эффективности турбоустановок, турбины, котла, камеры сгорания ГТУ, теплообменных аппаратов, компрессоров, насосов.

4. Темы рефератов:

1. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в энергетике России.
2. Пути увеличения эффективности термодинамических циклов.
3. Цикл Калины, как перспективное направление преобразования теплоты в электроэнергию.
4. Оценка возможности повышения тепловой экономичности действующих электростанций.
5. Недоотпуск энергии. Экономические последствия.
6. Информационные технологии обеспечения надежности работы электростанции.
7. Оценка области применимости тепловых насосов в системах теплоснабжения.
8. Место и роль ТЭЦ в обеспечении надежного энергоснабжения потребителей.

#### **6.4. Контроль самостоятельной работы**

Оценка результатов самостоятельной работы организуется как единство двух форм: самоконтроль и контроль со стороны преподавателей.

Для текущего контроля в течение семестра предусматривается:

- результаты выполнения и защиты индивидуальных заданий и написания реферата;
- 3 контрольных работы в семестр по материалам лекций и практических занятий с целью проведения рейтинговой аттестации в конце каждого месяца (с 25 по 28 число).

В конце семестра студент должен набрать минимум баллов, необходимый для сдачи зачета. Подробно о видах оцениваемых работ и рубежных значениях суммы баллов изложено в рейтинг-плане. Рейтинг планы, тесты, вопросы и задачи для контрольных, вопросы итогового контроля и экзаменационные билеты прилагаются к рабочей программе.

#### **6.5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов**

При изучении дисциплины используются:

- Технические средства аудитории с мультимедийными средствами (компьютеры, мониторы, экраны).
- Автоматизированная система управления познавательной деятельностью студента (АСУ ПДС).
- Лекционный материал в среде Power Point.
- Видеофильмы «Паровая турбина К-800-23,5», «Преобразование энергии в турбинной ступени».
- Компьютерные программы:
  - «regress» – программа регрессионного анализа для обработки результатов эксперимента;
  - WaterSteamPro – программа теплофизических и термодинамических свойств теплоносителей;
  - «TABL1», «TFS», «TFM» – для расчета свойств теплоносителей.

### **7. Средства (ФОС) текущей и итоговой оценки качества освоения дисциплины**

ФОС включает перечень вопросов текущего контроля для оценки текущей успеваемости и промежуточной аттестации студентов по итогам освоения дисциплины; задания и задачи для оценки приобретенных студентами умений.

#### **7.1. Перечень вопросов текущего контроля**

Текущий контроль по дисциплине обеспечивается путем устного опроса при защите заданий и тестированием по модулям дисциплины. Примеры вопросов и тестов приведены ниже.

##### Модуль 1

1. В чем заключается отличие в определении эффективности абсолютными и относительными КПД?
2. Определите понятие «эффективная мощность турбины». Как она определяется и чем отличается от мощности идеальной турбины?

3. Определите понятие «внутренняя мощность турбины». Как она определяется и чем отличается от электрической мощности турбогенератора?
4. Определите понятие «мощность идеальной турбины». Как она определяется и чем отличается от эффективной мощности турбины?
5. Если известно количество подведенной теплоты к паротурбинной установке, то что надо знать, чтобы определить эффективную мощность турбины? (Подробно!)
6. Если известна внутренняя мощность турбины, то что надо знать, чтобы определить количество подведенной теплоты к паротурбинной установке? (Подробно!)
7. Какое течение газа называется диффузорным? Как при таком течении изменяются параметры и почему?
8. Уравнение сохранения энергии для рабочих лопаток.
9. Уравнение сохранения энергии для неподвижных каналов турбинной ступени.
10. Различие в уравнениях неразрывности для теоретического и действительного течений.
11. Во сколько раз будут отличаться расходы пара через трубы, если их радиусы отличаются в три раза при прочих равных условиях? (Доказать!)
12. Во сколько раз нужно увеличить диаметр трубы, чтобы пропустить в два раза больший расход при прочих равных условиях?
13. Вывести формулу зависимости теоретической скорости на выходе из сопла от отношения давлений.
14. Запишите уравнение неразрывности для входного и выходного сечения канала.
15. Как изменится расход пара через сопло с известной площадью на выходе при изменении отношения давлений от 1 до 0. Почему так?
16. Дайте понятие коэффициента скорости и покажите его связь с коэффициентом потерь располагаемой энергии.
17. Определите понятие «критические параметры расширения».
18. Уравнение неразрывности в дифференциальной форме и его интерпретация для сопла.
19. Вывести формулу определения критического отношения давлений при идеальном расширении газа.
20. Определите понятие «параметры торможения» и как их определить по  $hs$ -диаграмме.
21. Какие величины определяют скорость пара на выходе из сопла при изоэнтропном расширении.
22. Дайте понятие коэффициента потерь располагаемой энергии и покажите его связь с коэффициентом скорости.
23. Дайте понятие коэффициента расхода, его физический смысл и покажите его связь с коэффициентом скорости.
24. Доказать, что для действительного процесса расширения критическое отношение давлений меньше чем для теоретического.

## Модуль 2

1. Как определить полное усилие (силу), действующие на рабочие лопатки турбинной ступени, по **уравнению сохранения энергии**?
2. Как определить тип канала (суживающийся или расширяющийся) рабочих решеток турбинной ступени, если заданы начальные параметры пара перед ступенью ( $p_0, t_0, c_0$ ), конечное давление ( $p_2$ ) и степень реактивности ( $\rho$ )?
3. Показать, как работа (мощность) на лопатках турбинной ступени связана с моментом силы, развиваемой ступенью.
4. Доказать, что в рабочих лопатках турбинной ступени ускорение потока происходит в относительном движении.



5. Доказать, что потеря располагаемой энергии в сопловых лопатках турбинной ступени уменьшается при увеличении степени реактивности при срабатывании одинакового теплоперепада.
6. Доказать, что относительный КПД на лопатках ступени наиболее сильно зависит от потери с выходной скоростью.
7. Доказать аналитически, что при определении работы (мощности) на лопатках турбинной ступени **по уравнению сохранения энергии** необходимо учитывать потерю с выходной скоростью.
8. Во сколько раз оптимальный теплоперепад ступени с диаметром 1,4 м больше по сравнению со ступенью диаметром 0,9 м?
9. Во сколько раз оптимальный диаметр ступени со степенью реактивности 0,4 отличается от ступени с  $\rho=0,1$ ? (Ступени срабатывают одинаковый теплоперепад.)
10. Изобразить действительный процесс расширения в  $hs$ -диаграмме для ступени с  $\rho=0$  (с указанием всех потерь располагаемой энергии в проточной части).
11. Изобразить действительный процесс расширения в  $hs$ -диаграмме для ступени с  $\rho<0$  (с указанием всех потерь располагаемой энергии в проточной части).
12. Доказать, что с увеличением числа венцов рабочих лопаток ( $m=1,2,3\dots$ ) оптимальное отношение скоростей уменьшается в  $m$  раз.
13. Почему располагаемый теплоперепад ступени постоянный по высоте лопаток?
14. Построить процессы расширения пара в корневом, среднем и периферийном сечении ступени.
15. Почему при оптимальном отношении давлений для двухвенечной ступени КПД двухвенечной ступени больше чем как у одновенечной, так и трехвенечной?
16. Определите зоны эффективности применения ступеней с различным числом венцов рабочих лопаток.
17. Построить процесс расширения пара в ступени с тремя венцами рабочих лопаток.
18. Почему и как изменяются профили сопловых и рабочих лопаток при использовании закрутки по методу постоянства циркуляции?
19. Почему реактивность изменяется по высоте рабочих лопаток?

### Модуль 3

1. Изменение треугольников скоростей ступени при неизменных начальных параметрах и изменении расхода пара через нее (а:  $G>G_0$ ; б:  $G<G_0$ ).
2. КПД турбины при дроссельной системе парораспределения. Зависимость коэффициента дросселирования от отношения давлений на турбину.
3. Изобразить процесс расширения пара в  $hs$ -диаграмме при неизменных начальных параметрах и изменении расхода пара через нее (а:  $G>G_0$ ; б:  $G<G_0$ ).
4. Как определить энтальпию пара в камере регулирующей ступени при переменном режиме.
5. Изменение давлений пара по проточной части турбины при возникновении в одной из ступеней критического режима.
6. Как определить давление пара перед первой ступенью турбины при дроссельной системе парораспределения и изменившемся расходе пара через турбину.
7. Изобразить в  $hs$ -диаграмме процесс расширения пара в турбине с сопловым парораспределением при расчетном режиме и режиме с частичным пропуском пара.
8. Изменение давлений пара по проточной части турбины при докритическом режиме течения во всех ступенях.

9. Изобразить в  $hs$ -диаграмме процесс расширения пара в турбине с обводным парораспределением при расчетном режиме и режиме с частичным пропуском пара.
10. Изменение теплоперепадов по ступеням проточной части конденсационной турбины
11. Определение КПД проточной части турбины с сопловым парораспределением при частичной нагрузке.
12. Факторы, влияющие на выбор располагаемого теплоперепада на регулируемую ступень.
13. Изменение давлений и расходов по проточной части турбины при обводной системе парораспределения.
14. Детальный расчет ступени турбины при переменном режиме.

#### Модуль 4

1. Турбина с регулируемым отбором пара. Заданы начальные параметры, давление в отборе, давление в конденсаторе, отпускаемая теплота внешним потребителям, расход пара в конденсатор. Построить процесс и определить электрическую мощность турбины. Параметры расчетного режима известны.
2. Какая система парораспределения может применяться для противоаварийных турбин и почему?
3. Турбина с регулируемым отбором пара. Заданы начальные параметры, давление в отборе, давление в конденсаторе, расход пара на турбину, расход пара в конденсатор. Построить процесс, определить электрическую мощность турбины и отпускаемую теплоту. Параметры расчетного режима известны
4. Недостатки противоаварийных турбин.
5. Турбина с регулируемым отбором пара. Заданы начальные параметры, давление в отборе, давление в конденсаторе, расход пара на турбину, электрическая мощность турбины. Построить процесс и определить расход пара в конденсатор. Параметры расчетного режима известны.
6. Определить понятие теплофикационной и конденсационной мощности турбины с регулируемым отбором.
7. Турбина с регулируемым отбором пара. Заданы начальные параметры, давление в отборе, давление в конденсаторе, расход пара на турбину, отпускаемое тепло. Построить процесс, определить электрическую мощность и расход пара в конденсатор. Параметры расчетного режима известны.
8. Определить понятие теплофикационной и конденсационной мощности турбины с регулируемым отбором.

#### Модуль 6

1. Почему удельный расход теплоты на выработку электроэнергии для конденсационного потока всегда больше, чем для потока отбора ?
2. Почему в большинстве случаев ТЭЦ имеют неблочную компоновку?
3. Участвует ли турбина с противоаварийным в регулировании частоты сети, если регулятор противоаварийного? Как работает система защиты турбины от разгона при внезапном отключении генератора от сети?
4. Можно ли по удельному расходу пара на производство электроэнергии для турбин с противоаварийным судить о совершенстве этих турбин?
5. Почему системы регулирования турбин с регулируемым отбором пара выполняют связанными?
6. Каковы преимущества регулирующей диафрагмы с несколькими рядами окон перед диафрагмой с одним рядом окон?

7. Почему турбины с отборами пара предпочтительно выполнять с сопловым парораспределением?
8. В чем состоит выигрыш от использования ступенчатого подогрева сотовой воды? Усложняет ли он конструкцию турбины?
9. Когда работа теплофикационной турбины с использованием встроенного в конденсатор теплофикационного пучка является выгодной?
10. Почему опорные поверхности ЦНД теплофикационных турбин стремятся максимально приблизить к горизонтальному разъему?
11. Почему для теплофикационных установок редко используют промежуточный перегрев пара?
12. Можно ли в турбине с промежуточным отбором пара и противодавлением обеспечить одновременное автоматическое регулирование давления в отборе и в выходном патрубке и мощности?
13. В чем преимущества и недостатки установки двух упорных подшипников в турбине ПТ-60-130 ЛМЗ?
14. Как осуществляется регулирование температуры прямой сетевой воды при снижении электрической мощности в турбине с нерегулируемыми отборами пара на теплофикацию

## Модуль 8

1. Для чего турбина снабжается системой автоматического регулирования?
2. Нарисуйте простейшую схему автоматического управления.
3. Что изображает статическая характеристика системы регулирования?
4. Определите степень неравномерности системы регулирования при  $n_0=50$  1/с, если частота вращения на холостом ходу 51 1/с, а при максимальной нагрузке 49 1/с.
5. Может ли статическая характеристика иметь горизонтальные участки? Почему в областях малых и максимальных нагрузок ее делают более крутой?
6. Определите возможный диапазон самопроизвольных колебаний нагрузки для турбины мощностью 120 МВт со степенью неравномерности 4,5 % и степенью нечувствительности 0,2 %.
7. Какие функции выполняет механизм управления турбиной? Как он влияет на статическую характеристику регулирования?
8. В чем преимущества гидравлических связей перед рычажными?
9. В чем основное отличие гидродинамических систем регулирования турбины от других систем?
10. Как должна работать система регулирования при отключении генератора от сети?
11. Для чего систему регулирования снабжают дифференциатором и каков принцип его работы?
12. В чем отличия в работе гидравлической и электрогидравлической систем регулирования?
13. В чем преимущества быстроходного бесшарнирного регулятора частоты вращения перед тихоходным?
14. Какие требования предъявляются к регулирующим клапанам?
15. Зачем в турбине предусматриваются автоматические системы защиты?
16. Назовите исполнительные органы системы защиты турбины от разгона. Почему на линиях промежуточного перегрева пара устанавливают стопорные, а на линиях отборов – обратные клапаны?
17. Вернутся ли к исходному состоянию бойки автомата безопасности после его срабатывания и прекращения подачи пара в турбину? Каково при этом будет положение стопорных и регулирующих клапанов?
18. Чем опасен осевой сдвиг ротора относительно статора?
19. Чем опасно возрастание давления в выходном патрубке?

20. Для каких ЦНД более опасно возрастание давления в выходном патрубке: с выносными или встроенными подшипниками?

### Модуль 9

1. Назовите основные функции конденсатора.
2. Назовите основные устройства конденсационной установки их назначение.
3. Почему в конденсаторе образуется глубокий вакуум?
4. Чем вредны присосы воздуха в конденсатор?
5. Почему для турбин насыщенного пара присосы воздуха больше, чем для турбин перегретого пара той же мощности?
6. Почему компоновку основного пучка конденсатора выполняют ленточной?
7. В каком ходе охлаждающей воды конденсатора и почему размещают воздухоохладитель?
8. Для чего конденсаторы мощных турбин выполняют секционными?
9. Из какой секции многосекционного одноходового конденсатора следует производить отсос паровоздушной смеси?
10. Что такое переохладение конденсата и чем оно вредно?
11. Чем опасно попадание сырой воды в паровое пространство конденсатора?
12. Почему конденсаторы крупных турбин крепят к корпусу ЦНД только посредством сварки?
13. Почему конденсатор не крепят к фундаменту жестко, а устанавливают его на пружинах?
14. Какие конструктивные решения обеспечивают плотное соединение трубок и трубной доски конденсатора?
15. Каковы преимущества и недостатки конструкции двойной трубной доски?
16. Какие меры принимают для уменьшения переохладения конденсата?
17. Для какой цели служит встроенный пучок в конденсаторах теплофикационных турбин?
18. Что такое кратность охлаждения?
19. Чем отличается прямоточное водоснабжение от оборотного? В чем преимущества и недостатки каждого из них?
20. В чем главная особенность условий работы конденсатных насосов? Когда конденсатный насос работает надежнее: при глубоком вакууме или при атмосферном давлении в конденсаторе?

### Модуль 10

1. Почему ГТУ, в отличие от паровой турбины, является самодостаточным энергетическим объектом?
2. Каково принципиальное термодинамическое отличие рабочего тела ГТУ от рабочего тела паровой турбины?
3. Какой элемент ГТУ определяет ее предельную мощность?
4. Как влияет температура, барометрическое давление и влажность окружающей среды на мощность и экономичность ГТУ?
5. Каков основной способ повышения экономичности ГТУ?
6. Назовите конструктивные мероприятия, обеспечивающие повышение экономичности ГТУ.
7. Каковы требования к температуре выхлопных газов ГТУ, работающих в составе ПГУ? Какими средствами она обеспечивается?
8. Как влияет охлаждение элементов проточной части газовой турбины на экономичность ГТУ?

9. Назовите потери энергии, возникающие при использовании охлаждения газовой турбины.
10. Каковы преимущества и недостатки ГТУ с промежуточными подводом тепла в камере сгорания и охлаждением циклового воздуха?
11. Как влияют гидравлические сопротивления фильтровальной установки, камеры сгорания и выхлопного тракта на экономичность ГТУ?
12. Как организовано охлаждение сопловых и рабочих лопаток газовой турбины в ГТУ?
13. Какие типы охлаждения используются для сопловых лопаток?
14. Каковы особенности проточной части воздушного компрессора?
15. С какой целью для первых ступеней компрессора используют защитные покрытия?
16. Назовите функции поворотного входного направляющего аппарата компрессора.
17. Для какой цели компрессор ГТУ снабжают антипомпажными клапанами?
18. Назовите типы роторов, используемых для ГТУ. В чем их преимущества и недостатки?
19. С какой целью корпуса современных ГТУ снабжают горизонтальным разъемом?
20. Как опирается корпус ГТУ на фундамент и как организовано его свободное тепловое расширение?
21. Почему современные ГТУ используют только двухопорные роторы?
22. С какой целью выполняется «запирание» корпусов подшипников ГТУ?
23. Для чего ГТУ снабжается валоповоротным устройством?
24. Почему генератор ГТУ целесообразнее располагать со стороны компрессора?
25. Назовите типы камер сгорания, используемых в современных ГТУ?
26. В чем состоят недостатки выносных камер сгорания?
27. Каковы особенности гибридной горелки?
28. С какой целью в камерах сгорания устанавливают пилотные горелки, и в каком режиме горения они функционируют?
29. Назовите ограничения по использованию жидкого топлива в ГТУ?
30. Назовите преимущества и недостатки кольцевых и трубчато-кольцевых камер сгорания современных ГТУ.

## **7.2. Примеры индивидуальных задач:**

### **Задача 1. Показатели ПТУ**

ПТУ имеет начальные параметры  $p_0=14$  МПа,  $t_0=530^\circ\text{C}$ ,  $p_k=4,5$  кПа. Электрическая мощность турбогенератора  $N_{\text{э}}=150$  МВт. Определить расход пара на турбину ( $G_0$ ), количество подведенной теплоты к установке ( $Q_{\text{ТУ}}$ ), всю систему относительных и абсолютных КПД. Принять  $\eta_m=0,98$ ,  $\eta_{\text{э}}=0,985$ . Провести анализ полученных результатов.

### **Задача 2. Расчет сопла.**

#### **Вариант 1**

Заданы:

- длина канала  $x=0,10$  м;
- начальные параметры (статические) пара  $p_0=1,2$  МПа;  $t_0=320$  С;
- начальная скорость  $c_0=65$  м/с;
- расход через сопло  $G=6,2$  кг/с.

Определить:

- 1) изменение площади проходного сечения канала по шести сечениям) при равномерном изменении давления по длине канала ( $\Delta p=9$  МПа/м)
- 2) средние ускорения потока на участках канала;
- 3) площадь минимального сечения канала.

Провести анализ полученных результатов.

### Вариант 2

Построить зависимость изменения проходного сечения сопла, скорости потока, удельного объема, относительного давления от располагаемого теплоперепада при расходе пара через сопло  $G=10$  кг/с,  $c_0=40$  м/с,  $p_0=10$  МПа,  $t_0=350$  °C. Теплоперепад равен 0,20,40,60,80,100,120.

### Задача 3-1. Тепловой расчет ступени

#### Вариант 1

Построить зависимость изменения относительного лопаточного КПД ступени от отношения скоростей.

Задано: а) начальные параметры:  $p_0=1,0$  МПа;  $t_0=345$  °C;  $c_0=120$  м/с;

б) средний диаметр ступени:  $d=1,05$ ;

в) степень реактивности ступени:  $\rho=0,2$ ;

г) частота вращения ротора:  $n=50$  с<sup>-1</sup>;

д) угол выхода абсолютной скорости пара из сопел:  $\alpha_1=15$ °;

е) угол выхода относительной скорости пара из рабочих лопаток:  $\beta_2=(\beta_1-8)$ °;

ж) принять коэффициенты скорости:  $\varphi=0,98$ ;  $\psi=0,97$ ;

з) давление за ступенью принимает значения:  $p_2=(0,85; 0,8; 0,76; 0,74; 0,7)$  МПа.

Результаты вариантных расчетов представить в виде таблицы. Представить треугольники скоростей по вариантам выполненные в масштабе. Провести анализ полученных результатов.

#### Вариант 2

На входе в турбинную решетку поток имеет следующие параметры:  $c_0=80$  м/с,  $p_0=10$  МПа,  $t_0=350$  °C,  $\alpha_0=90$ °.

Определить: а) какой угол выхода будет иметь турбинная решетка;

б) отклонение в косом срезе решетки;

в) какой теплоперепад, определенный по статическим параметрам, србатывается в решетке;

при отношениях давлений на решетку (0,8; 0,6; 0,4; 0,2) для двух случаев:

I. Теоретический процесс расширения.

II. Действительный процесс расширения с коэффициентом потерь  $\zeta_c=0,054$ . С учетом изменения критического отношения давлений.

Результаты представить в виде таблицы и графических зависимостей. Провести анализ полученных результатов.

### Задача 4. Ступени скорости.

Определить изменение относительного лопаточного КПД в зависимости от  $x_\phi$  для двух ступеней: одновенечной и двухвенечной.

Обе ступени имеют средний диаметр  $d_{cp}=0,86$  м. Параметры пара перед ступенью  $c_0=80$  м/с,  $p_0=10$  МПа,  $t_0=350$  °C, давление за ступенью  $p_2=6,3$  МПа. Зависимость построить по 5 точкам, приняв значения  $x_\phi=(0,18; 0,26; 0,33; 0,47; 0,52)$ , изменение  $x_\phi$  обеспечивается изменением частоты вращения.

Дополнительно принять:  $\alpha_0=90$ °,  $\alpha_1=14$ °, углы выхода из рабочих лопаток и направляющего аппарата меньше углов входа на  $(2\div 5)$ °. Степень реактивности ступени  $\rho=0,1$  (в двухвенечной ступени реактивность разбита на рабочие лопатки и направляющий аппарат поровну). Коэффициенты скорости:  $\varphi=0,97$ ;  $\psi_{p1}=0,96$ ;  $\psi_n=0,96$ ;  $\psi_{p2}=0,96$ .

Построить в масштабе треугольники скоростей  $x_\phi=(0,18; 0,26; 0,47)$ . Привести процессы расширения в ступенях в  $h_s$  – диаграмме.

### Задача 5. Определение геометрических характеристик ступени.

Определить геометрические размеры одновенечной ступени при оптимальном отношении скоростей.

Исходные данные:

- данные и результаты расчета задачи 4-1;
- расход пара  $G=150 \text{ кг/с}$ .

Коэффициенты расхода и коэффициенты потерь располагаемой энергии определить по обобщенным газодинамическим характеристикам решеток.

Привести эскиз ступени.

#### **Задача 6. Закрутка лопаток**

Выполнить расчет «закрутки» лопаток турбинной ступени методом постоянства циркуляции.

Расчет выполнить, разбив лопатки на три сечения: среднее, корневое и периферийное.

Исходные данные:

- расход пара  $G=683 \text{ кг/с}$ ;
- начальные параметры:  $p_0=1,52 \text{ МПа}$ ;  $x_0=0,9$ ;  $c_0=100 \text{ м/с}$ ;
- конечное давление  $p_2=0,96 \text{ МПа}$ ;
- частота вращения  $n=50 \text{ с}^{-1}$ .

Коэффициенты расхода и коэффициенты потерь располагаемой энергии определить по обобщенным газодинамическим характеристикам решеток.

Привести процессы расширения в  $hs$ -диаграмме и треугольники скоростей для рассчитываемых сечений, а также эскиз решеток профилей.

#### **Задача 7. Расчет многоступенчатой турбины**

##### **Вариант 1**

Определить для двух вариантов исходных данных:

- внутренний относительный КПД многоступенчатой турбины;
- физический коэффициент возврата теплоты и сравнить его с рекомендуемой формулой.

Исходные данные:

- начальные параметры:  $p_0=6,0 \text{ МПа}$ ,  $t_0=340 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- конечное давление:  $p_k=5 \text{ кПа}$ ;
- число ступеней: *вариант I – 5, вариант II – 8*;
- внутренний относительный КПД каждой ступени:  $0,83$ ;
- распределение теплоперепадов по основной изоэнтропе: *равномерное*.

##### **Вариант 2**

Определить для двух вариантов исходных данных:

- внутренний относительный КПД многоступенчатой турбины;
- физический коэффициент возврата теплоты и сравнить его с рекомендуемой формулой.

Исходные данные:

- начальные параметры:  $p_0=6,0 \text{ МПа}$ ,  $t_0=340 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- конечное давление:  $p_k=5 \text{ кПа}$ ;
- число ступеней:  $7$ ;
- внутренний относительный КПД каждой ступени: *вариант I –  $0,8$ , вариант II –  $0,87$* ;
- распределение теплоперепадов по основной изоэнтропе: *равномерное*.

#### **Задача 8. Определение количества ступеней турбины**

Начальные параметры пара перед цилиндром:  $p_0=9,2 \text{ МПа}$ ,  $t_0=460 \text{ }^\circ\text{C}$ ; конечное давление за цилиндром  $p_k=2,8 \text{ МПа}$ ; расход пара через цилиндр  $G=160 \text{ кг/с}$ .

Определить число ступеней в цилиндре для двух вариантов:

- а) диаметр первой ступени  $d_1=0,8 \text{ м}$ ;
- б) диаметр первой ступени  $d_1=0,95 \text{ м}$ ;

при условии постоянства корневого диаметра во всех ступенях.  
Выполнить анализ полученных результатов.

### **Задача 9. Переменный режим работы ступени**

Турбинная ступень имеет геометрические размеры (вариант 1-1 , таблица 1).

Определить:

А: давление и температуру пара перед ступенью, внутренний относительный КПД ступени и реактивность ступени при следующих параметрах переменного режима (вариант 1-1 , таблица 1).

В: тоже, что в пункте А, НО давление и расход составляют 0,7 от соответствующих заданному. Энтальпия в конце процесса равна полученной энтальпии в расчете по пункту А.

### **Задача 10. Переменный режим работы турбины.**

Конденсационная турбина с двумя регулируемым отборами с начальными параметрами:  $p_0=12,7$  МПа,  $t_0=560^\circ\text{C}$  и конечным давлением  $p_k=4$  кПа в расчетном режиме имеет следующие параметры:

- давление в камере регулирующей ступени  $p_{pc0}=8,5$  МПа;
- давление в первом отборе  $p_{п0}=1,5$  МПа, давление за регулирующим органом первого отбора  $p'_{п0} = 1,2$  МПа, расход пара в первый отбор  $G_{п0}=100\text{т/ч}$ ;
- давление во втором отборе  $p_{т0}=0,18$  МПа, давление за регулирующим органом второго отбора  $p'_{т0} = 0,08$  МПа, количество теплоты, отпускаемой из второго отбора  $Q_{т0}=80\text{МВт}$ ;
- электрическая мощность турбогенератора  $N_{э0}=120\text{МВт}$ ;
- внутренние относительные КПД частей и регулирующей ступени в расчетном режиме:  $\eta_{oi0}^{ЧВД} = 0,82$ ,  $\eta_{oi0}^{ЧСД} = 0,86$ ,  $\eta_{oi0}^{ЧНД} = 0,64$ ,  $\eta_{oi0}^{pc} = 0,74$ ;

Определить электрическую мощность турбогенератора, если:

- необходимая температура пара теплофикационного отбора снизится на  $17^\circ\text{C}$  , количество отпускаемой теплоты из теплофикационного отбора останется тем же самым;
- необходимая температура пара производственного отбора снизится на  $6^\circ\text{C}$  , количество отпускаемой теплоты из производственного отбора  $Q_{п}=58\text{МВт}$ ;
- турбина работает по тепловому графику (вентиляционный расход пара  $G_k^{ген} = 7\text{кг/с}$ );
- внутренние относительные КПД частей и регулирующей ступени:  $\eta_{oi}^{ЧВД} = 0,81$ ;  $\eta_{oi}^{ЧСД} = 0,86$ ;  $\eta_{oi}^{pc} = 0,71$ .

### **Задача 11. Конденсационная установка**

Паротурбинная установка работает при начальных параметрах:  $p_0=13,0$  МПа;  $t_0=540^\circ\text{C}$ . Расход пара на турбину  $G_0=250\text{кг/с}$ . Внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi}=0,83$ . Конденсатор паротурбинной установки имеет следующие характеристики:

- внутренний диаметр трубок:  $d_{вн}=29\text{мм}$ ;
- длина трубок:  $l=24\text{м}$ ;
- число трубок:  $z=7000$ ;
- коэффициент теплопередачи в конденсаторе  $k=2,3\text{кВт/м}^2\text{К}$ ;
- скорость воды в трубках:  $w_g=2,2\text{м/с}$ ;
- температура воды на входе в конденсатор:  $t_{в1}=12^\circ\text{C}$ .

Определить внутреннюю мощность турбины и термический КПД турбинной установки А) при «нормальной» работе конденсатора; В) при отключении одной половины конденсатора и сохранении скорости воды в трубках.

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**



## Основная

1. **Паровые** и газовые турбины для электростанций. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.
2. **Паровые** и газовые турбины для электростанций. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательство МЭИ, 2008. 556 с.
3. Singh, Murari. **Blade Design and Analysis for Steam Turbines** / M. P. Singh, G. Lucas. — New York : McGraw-Hill, 2011. — 364 p. : il.

## Дополнительная

4. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. **Теплофикационные** паровые турбины и турбоустановки. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.
5. Костюк А.Г. **Динамика** и прочность турбомашин: учебник для вузов/А.Г. Костюк – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
6. Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. **Паровые** и газовые турбины атомных электростанций. - М., Энергоатомиздат, 1985. - 256 с.
7. Щегляев А.В. **Паровые** турбины. Учебник для вузов. Кн. 1.- М.: Энергоатомиздат, 1993.- 384 с.
8. Щегляев А.В. **Паровые** турбины. Учебник вузов. Кн. 2. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 416 с.
9. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. **Переменные** и переходные режимы в паровых турбинах. - М.: Энергия, 1982. - 496 с.
10. Трухний А.Д. **Стационарные** паровые турбины. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 640 с.
11. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. **Конденсационные** установки паровых турбин. - М. 1994. - 167 с.
12. Щегляев А.В. **Паровые** турбины. - М.: Энергия, 1976. - 368 с.
13. **Паровые** и газовые турбины: Сборник задач: Учебное пособие для вузов. /Г.С.Самойлович, Б.М.Трояновский, В.Б.Нитусов, А.Н.Занин. Под ред. Г.С. Самойловича и Б.М.Трояновского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - с.
14. **Стационарные** газотурбинные установки. Справочник. /Под ред. Л.С.Арсеньева и Д.Н.Тырышкина. - Л.: Машиностроение, 1989. - 420 с.
15. **Атлас** конструкций деталей турбин. Учебное пособие. /Трухний А.Д., Крупенников Б.Н. и др. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 148 с

## Журналы

1. «Теплоэнергетика».
2. «Газотурбинные технологии».
3. «Электрические станции».
4. «Энергохозяйство за рубежом»;
5. «Известия вузов», серия: Энергетика;
6. «Мировая энергетика»;
7. «Энергобезопасность и энергосбережение»;
8. «Теплоэнергетика» – реферативный журнал;
9. International Journal of Heat and Mass Transfer;
10. International Journal of Heat and Fluid Flow;
11. International Journal of Thermal Sciences;

12. Experimental Thermal and Fluid Science;
13. Applied Energy;
14. Energy and Buildings;
15. Energy Conversion and Management;
16. International Journal of Engineering Science;
17. Energy;
18. Applied Thermal Engineering;

*программное обеспечение*

- Программное обеспечение АСУ ПДС – обратная связь.
- Презентации лекций в среде PowerPoint.
- Компьютерные программы:
- программа определения термодинамических и теплофизических параметров воды и водяного пара;
- «regress» – программа регрессионного анализа для обработки результатов эксперимента;
- WaterSteamPro – программа теплофизических и термодинамических свойств теплоносителей;
- «TABL1», «TFS», «TFM» – для расчета свойств теплоносителей.
- Методические указания к выполнению практических работ.
- статический тренажер «Технологическая схема первого контура АЭС»;
- статический тренажер «Технологическая схема второго контура АЭС»;
- ситуационный тренажер регенеративной установки;
- программы автоматизированного контроля по разделам курса.

*Internet-ресурсы:*

1. - 0 «7 » -  
<http://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>;
2. С Elibrary - , 0 : URL:  
<http://elibrary.ru/>;
3. 3 / 0 1 . :  
<http://biblio.dahluniver.ru/>

## 9. Условия реализации дисциплины

Освоение дисциплины предполагает использование академических аудиторий, соответствующих действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам.

Прочее: рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет.

Программное обеспечение:

<b>Функциональное назначение</b>	<b>Бесплатное программное обеспечение</b>	<b>Ссылки</b>
Офисный пакет	Libre Office 6.3.1	<a href="https://www.libreoffice.org/">https://www.libreoffice.org/</a> <a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice">https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice</a>
Операционная система	UBUNTU 19.04	<a href="https://ubuntu.com/">https://ubuntu.com/</a> <a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu">https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu</a>
Браузер	FirefoxMozilla	<a href="http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx">http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx</a>
Браузер	Opera	<a href="http://www.opera.com">http://www.opera.com</a>
Почтовый клиент	MozillaThunderbird	<a href="http://www.mozilla.org/ru/thunderbird">http://www.mozilla.org/ru/thunderbird</a>
Файл-менеджер	FarManager	<a href="http://www.farmanager.com/download.php">http://www.farmanager.com/download.php</a>
Архиватор	7Zip	<a href="http://www.7-zip.org/">http://www.7-zip.org/</a>
Графический редактор	GIMP (GNU Image Manipulation Program)	<a href="http://www.gimp.org/">http://www.gimp.org/</a> <a href="http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8">http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8</a> <a href="http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP">http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP</a>
Редактор PDF	PDFCreator	<a href="http://www.pdfforge.org/pdfcreator">http://www.pdfforge.org/pdfcreator</a>
Аудиоплеер	VLC	<a href="http://www.videolan.org/vlc/">http://www.videolan.org/vlc/</a>

## 10. Образовательные технологии

Преподавание дисциплины ведется с применением следующих видов образовательных технологий:

традиционные объяснительно-иллюстративные технологии, которые обеспечивают доступность учебного материала для большинства студентов, системность, отработанность организационных форм и привычных методов, относительно малые затраты времени;

технологии проблемного обучения, направленные на развитие познавательной активности, творческой самостоятельности студентов и предполагающие последовательное и целенаправленное выдвижение перед студентом познавательных задач, разрешение которых позволяет студентам активно усваивать знания (используются поисковые методы; постановка познавательных задач);

технологии развивающего обучения, позволяющие ориентировать учебный процесс на потенциальные возможности студентов, их реализацию и развитие;

технологии концентрированного обучения, суть которых состоит в создании максимально близкой к естественным психологическим особенностям человеческого восприятия структуры учебного процесса и которые дают возможность глубокого и системного изучения содержания учебных дисциплин за счет объединения занятий в тематические блоки;

технологии дифференцированного обучения, обеспечивающие возможность создания оптимальных условий для развития интересов и способностей студентов, в том числе и студентов с особыми образовательными потребностями, что позволяет реализовать в культурно-образовательном пространстве университета идею создания равных возможностей для получения образования технологии активного (контекстного) обучения, с помощью которых осуществляется моделирование предметного, проблемного и социального содержания будущей профессиональной деятельности студентов (используются активные и интерактивные методы обучения) и т.д.

Используемые образовательные технологии и методы направлены на повышение качества подготовки путем развития у обучающихся способностей к самообразованию и нацелены на активизацию и реализацию личностного потенциала каждого студента.

Максимальная эффективность педагогического процесса достигается путем конструирования оптимального комплекса педагогических технологий и (или) их элементов на личностно-ориентированной, деятельностной, диалогической основе и использования необходимых современных средств обучения.

Лист регистрации изменений рабочей программы дисциплины

[illegible]