

Федеральное агентство по образованию  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОУ ВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой энергетики  
\_\_\_\_\_ Н.В. Савина  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

ПАРОГАЗОВЫЕ И ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
для специальности 140101 – «Тепловые электрические станции»

Составитель: ст. преп. Храмцова Н.Н.

Благовещенск  
2007 г.

**Печатается по решению**  
редакционно-издательского совета  
энергетического факультета  
Амурского государственного  
университета

*Храмцова Н.Н.*

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Парогазовые и газотурбинные установки» для студентов специальности 140101 «Тепловые электрические станции». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. – 26 с.

Учебно-методический комплекс предназначен для оказания помощи студентам специальности 140101 «Тепловые электрические станции» в изучении дисциплины «Парогазовые и газотурбинные установки»: формирования знаний о схемах парогазовых и газотурбинных установок, их технико-экономических показателей, характеристик, оборудования и режимов работы.

© Храмцова Надежда Николаевна

© Амурский государственный университет, 2007

## АННОТАЦИЯ

В рамках направления 650800 «Теплоэнергетика» на кафедре Энергетики реализуется подготовка дипломированного специалиста по специальности 140101. Государственный образовательный стандарт подготовки инженера по специальности 140101 "Тепловые электрические станции" включает изучение дисциплины "Парогазовые и газотурбинные установки" в разделе ДС.1

Согласно учебному плану специальности данная дисциплина изучается на пятом курсе обучения (девятый семестр), предусмотрены следующие виды занятий и формы контроля:

Наименование	Всего часов
Лекции	28
Практические занятия	14
Лабораторные занятия	-
Самостоятельная работа	35
Курсовая работа	-
Вид итогового контроля	экзамен
Общая трудоемкость дисциплины	77

Учебно-методический комплекс дисциплины «Парогазовые и газотурбинные установки» включает в себя:

1. Рабочую учебную программу дисциплины «Парогазовые и газотурбинные установки» (Амурский государственный университет, кафедра «Энергетика», 2006. Автор – Храмцова Н.Н., ассистент каф. «Энергетика»);
2. Настоящий учебно-методический комплекс.

В настоящем учебно-методическом комплексе приведен краткий конспект лекций, методические рекомендации и методические указания по проведению практических занятий, график самостоятельной работы и методические указания по выполнению, комплекты заданий для практических работ, а также материалы по контролю качества образования (методические указания по организации контроля знаний студентов, критерии оценки знаний студентов и фонды тестовых заданий).

# 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

## 1.1. Цель преподавания дисциплины

Предметом изучения дисциплины "Парогазовые и газотурбинные установки ТЭС" являются основные типы и схемы парогазовых и газотурбинных установок.

Целью дисциплины является изучение схем парогазовых и газотурбинных установок, их технико-экономических показателей, характеристик, оборудования и режимов работы.

## 1.2. Задачи изучения дисциплины

Задачей изучения дисциплины является обеспечение знаний студентов в области парогазовых и газотурбинных установок.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать

- устройство современных стационарных газотурбинных установок (ГТУ);
- циклы газотурбинных установок;
- основные пути повышения термодинамической эффективности ГТУ;
- основные типы тепловых схем ГТУ;
- основные типы парогазовых установок (ПГУ);
- использование парогазовых схем для модернизации энергетических паросиловых блоков путем их надстройки газовыми турбинами;
- использование ПГУ при проектировании ТЭС с высокими экологическими показателями;
- КИП, автоматические регуляторы и технологические защиты в схемах парогазовых установок.

Уметь:

- выполнять расчет тепловых схем газотурбинных установок;
- выполнять расчет тепловых схем парогазовых установок;
- определять энергетические показатели парогазовых схем и их работы при переменном режиме.

## 1.3. Связь с другими дисциплинами специальности

*Перечень дисциплин, освоение которых необходимо при изучении данной дисциплины.*

Теоретические основы теплотехники. Термодинамика: Основные законы и термодинамические процессы идеальных и реальных газов; I, II законы термодинамики; таблицы,  $is$ - и  $pv$ - диаграммы водяного пара; истечение и процесс дросселирования газов и паров; циклы паротурбинных установок; компрессоры; циклы холодильных установок.

Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: основные положения теплопроводности; конвективного теплообмена; теплообмен излучением; конструкция и принцип действия теплообменных аппаратов.

Котельные установки и парогенераторы: конструкция котельных установок и принцип действия.

Турбины ТЭС и АЭС: конструкция и принцип действия паровых турбин, регенеративная схема.

## **2. КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

### ***Тема 1***

**Устройство современных стационарных газотурбинных установок (ГТУ).**

Основные элементы конструктивной схемы осевого компрессора ГТУ. Расчетный режим работы. Явление помпажа. Функции входного направляющего аппарата компрессора ГТУ. Конструкция камеры сгорания ГТУ. Экономичность, надежность и экологические характеристики камер сгорания ГТУ. Основные элементы газовой турбины. Характер изменения начальных параметров рабочего тела в ГТУ в зависимости от параметров наружного воздуха. Система охлаждения горячих деталей газовой турбины. Преимущества и недостатки в области применения ГТУ.

### ***Тема 2***

**Циклы газотурбинных установок.**

Замкнутые и разомкнутые циклы ГТУ. Циклы газотурбинных установок с подводом количества теплоты в процессе  $v=const$  и  $p=const$ . Характеристика термодинамических циклов и их анализ. Температурный коэффициент. Степень повышения давления.

### ***Тема 3***

**Основные пути повышения термодинамической эффективности ГТУ.**

Регенеративный подогрев воздуха на входе в камеру сгорания ГТУ. Применение многоступенчатого сжатия воздуха в компрессоре и многоступенчатого подвода тепла в ГТУ. Блочные системы энергетических ГТУ. Техническое водоснабжение. Основные факторы, влияющие на экономичность ГТУ. Методика расчета энергетических показателей ГТУ и их анализ при переменном режиме работы. Статические характеристики энергетических ГТУ.

### ***Тема 4***

**Основные типы тепловых схем ГТУ.**

Использование ГТУ в качестве пиковых установок. Основные тепловые схемы ГТУ. Пусковые и переменные режимы работы, системы управления ГТУ. Способы регулирования нагрузки энергетической ГТУ. Общие сведения и схемы ГТУ на АЭС. Компоновка главного корпуса газотурбинной электростанции.

### ***Тема 5***

#### **Парогазовые установки (ПГУ).**

Понятие о парогазовой установке. Типовые схемы ПГУ. Термодинамические циклы основных типов ПГУ. Компоновка оборудования ПГУ. Паротурбинные установки в тепловой схеме ПГУ.

### ***Тема 6***

#### **Парогазовые установки с утилизационными паровыми котлами (УПК).**

Конструктивные схемы котла-утилизатора. Состав оборудования, характеристики и расчет показателей ПГУ с УПК без дожигания топлива в котле (бинарные установки) и с дожиганием топлива. Степень бинарности. Выбор основных параметров ПГУ с УПК. Парогазовая установка с двухконтурным КУ. Анализ режимов работы, диаграммы режимов.

### ***Тема 7***

#### **Парогазовые установки с высоконапорным парогенератором (ВПГ).**

Состав оборудования, характеристики и расчет показателей ПГУ с ВПГ. Методы расчета показателей и анализ ПГУ с ВПГ с учетом переменных режимов их работы.

### ***Тема 8***

#### **Парогазовые установки со сбросом уходящих газов ГТУ в топку парового котла.**

Особенности тепловых схем ПГУ сбросного типа. Тепловые схемы пылеугольных ПГУ сбросного типа. Газомазутные ПГУ сбросного типа. Состав оборудования, характеристики и расчет показателей ПГУ со сбросом уходящих газов ГТУ в топку парового котла. Методы расчета показателей с учетом переменных режимов их работы.

### ***Тема 9***

#### **Использование парогазовых схем для модернизации энергетических паросиловых блоков путем их надстройки газовыми турбинами.**

Анализ тепловых схем и технических решений, определение энергетических показателей парогазовых схем и их работа при переменном режиме. Установка ГТУ в водогрейной котельной. Тригенерация. Тепловые схемы теплоснабжения с ГТУ-ТЭЦ.

### ***Тема 10***

#### **Парогазовые установки на твердом топливе.**

Технология газификации углей. Использование технологии внутрицикловой газификации угля для создания ПГУ с утилизационными паровыми котлами. ПГУ с котлом с циркуляционным кипящим слоем (ЦКС) для сжигания низкосортных углей. Технологическая схема ПГУ с ЦКС.

### ***Тема 11***

#### **Роль ПГУ для сокращения вредного воздействия на окружающую среду.**

Использование ПГУ при проектировании ТЭС с высокими экологическими показателями. Определение выбросов вредных веществ с выходными газами. Система сероочистки дымовых газов паровых котлов с использованием известняка. Селективная каталитическая система подавления оксидов азота в газоходе паровых котлов.

### ***Тема 12***

#### **КИП, автоматические регуляторы и технологические защиты в схемах парогазовых установок.**

КИП, автоматические регуляторы и технологические защиты в схемах парогазовых установок. Система разворота вала.

## **3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

### **3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий**

Практические занятия предусматривают решение задач по темам дисциплины.

В начале практического занятия следует вспомнить необходимые для решения задач теоретические сведения (работа с аудиторией). Далее разбираются несколько (три, четыре – в зависимости от объема) типовых задач. Приводится (если это необходимо) алгоритм решения типовых задач. Разбираются примеры типовых ошибок. Далее для решения предлагаются более сложные задачи (одна, две), требующие креативного подхода.

Выдается домашнее расчетное задание (если оно предусмотрено по данной теме), анализируется выполнение предыдущего домашнего задания, разбираются типовые ошибки.

### 3.2. Перечень тем практических занятий.

1. Расчет циклов газотурбинных установок (2 часа).
2. Методы повышения КПД газотурбинных установок (2 часа).
3. Расчет энергетических показателей газотурбинных установок (2 часа).
4. Расчет характеристик парогазовых установок с утилизационными паровыми котлами (2 часа).
5. Расчет характеристик парогазовых установок с ВПГ (2 часа).
6. Определение энергетических показателей парогазовых установок для различных режимов работы (4 часа).

### 3.3. План проведения практического занятия

Тема занятия: Методы повышения КПД газотурбинных установок.

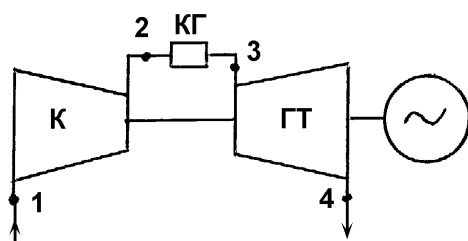
Цель: научить студентов определять параметры циклов газотурбинной установки.

Вопросы:

1. Какие установки называются газотурбинными?
2. Какое рабочее тело используется в газотурбинных установках?
3. Какие основные циклы ГТУ выделяют?
4. Что такое регенеративный подогрев?
5. Какие методы повышения КПД ГТУ применяют?

Теоретические сведения:

Схема простейшей газотурбинной установки дана на рис.1.



К – воздушный компрессор,  
 КГ – камера горения топлива,  
 ГТ – газовая турбина.  
 Кроме того, в состав газотурбинной установки входит топливный насос и пусковой мотор.

Рис.1

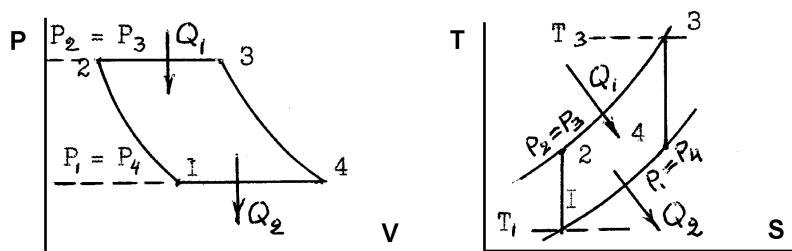


Рис.2



Идеальный цикл в координатных осях P-V и T-S дан на рис.2:

- 1-2 – адиабата сжатия в компрессоре;
- 3-4 – адиабата расширения в газовой турбине;
- 2-3 – изобара с подводом тепла в камере горения (при горении топлива с постоянным давлением);
- 4-1 – изобара с отводом тепла в окружающую среду.

Основные характеристики цикла и установки:

1. Степень сжатия в компрессоре (степень расширения в турбине):  $\sigma = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$
2. Отношение абсолютных значений граничных температур:  $\tau = T_1/T_3$
3. Термический КПД цикла:  $\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$
4. Коэффициент полезной работы, характеризующий долю полезной (электрической) мощности от полной мощности, развиваемой турбиной:  $\varphi = \frac{Q_T - Q_K}{Q_T}$

Все рассуждения ведутся по отношению к 1 кг рабочего вещества.

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_p (T_3 - T_2); & Q_T &= C_p (T_3 - T_4) \\ Q_2 &= C_p (T_4 - T_1); & Q_K &= C_p (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

Используя обычные термодинамические зависимости для адиабатного и изобарного процессов, после преобразований имеем:

$$\eta_t = 1 - \sigma^{-m}, \text{ где } m = \frac{K - 1}{K}; K - \text{показатель адиабаты. } \varphi = 1 - \tau \cdot \sigma^m$$

В действительном цикле учитывается реальность процессов в компрессоре и газовой турбине, где имеют место не адиабатные, а политропные процессы.

В результате цикл получит вид, представленный на рис.3, т.е., температура воздуха после компрессора будет определяться точкой 2', а газа после турбины – точкой 4'. Реальность процесса в этих элементах оценивается внутренним КПД каждого:  $\eta_t$  – турбины и  $\eta_k$  – компрессора.

В результате эффективность работы будет определяться уже не термическим КПД, а внутренним КПД газотурбинной установки -  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \frac{\eta_t Q_T - \frac{1}{\eta_k} Q_K}{Q_1}, \text{ где } Q_T = C_p (T_3 - T_4); Q_K = C_p (T_2 - T_1); Q_1 = C_p (T_3 - T_2').$$

Потерями давления в камере горения и при выхлопе газов, вследствие их мало-го значения, пока пренебрегаем. После преобразований получаем:

$$\eta_i = \frac{\eta_t (1 - \sigma^{-m}) - \frac{\tau}{\eta_k} (\sigma^m - 1)}{1 - \tau \left[ 1 + \frac{1}{\eta_k} (\sigma^m - 1) \right]}$$

Коэффициент полезной работы при действительном цикле может быть определен тем же способом, что и при цикле идеальном. После соответствующих преобразований получаем:  $\phi = 1 - \frac{\tau \cdot \sigma^m}{\eta_K \cdot \eta_T}$

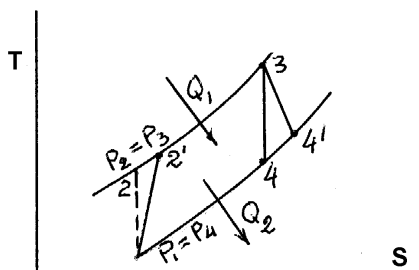


Рис.3.

Абсолютный электрический КПД ГТУ учитывает как внешние, так и внутренние потери энергии, имеющие место в ГТУ, и может быть определен из выражения:  $\eta_{\text{э}} = \eta_i \cdot \eta_{\text{кг}} \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{вм}} \cdot \eta_{\text{эг}}$ ,

где  $\eta_i$  – внутренний КПД ГТУ;

$\eta_{\text{кг}}$  – КПД камеры горения  $\approx 0,98-0,99$ ;

$\eta_p$  – КПД зубчатой передачи (если таковая имеется между силовой турбиной и электрогенератором)  $\approx 0,97-0,98$ ;

$\eta_m$  – механический КПД агрегата, отнесенный к его полезной мощности.

Удельный расход топлива, отнесенный к мощности на клеммах электрогенератора, с учетом всех затрат энергии на самообслуживание, определится из выражения:  $v = \frac{3600}{Q_p \cdot \eta_{\text{э}}}$ , кг/кВт·ч

Эффективным средством повышения экономичности простой схемы газотурбинной установки, работающей по циклу со сгоранием топлива при постоянном давлении, является регенерация тепла, то есть, использование в схеме тепла уходящих из турбины газов, которое безвозвратно теряется в установках, выполненных по простейшей схеме.

Принципиальная схема установки с регенератором дана на рис.4.

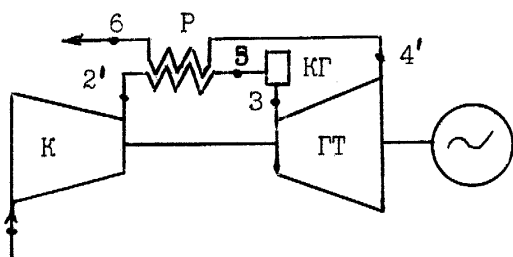


Рис.4

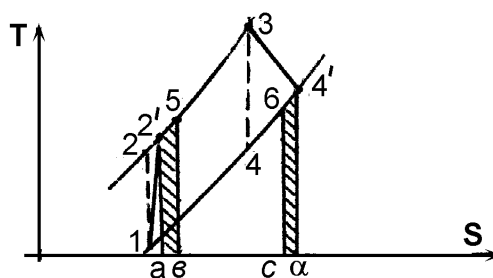


Рис.5

Воздух, сжатый в компрессоре, по пути следования в камеру сгорания проходит через регенератор (воздухоподогреватель), где подогревается за счет тепла отработавших газов, покидающих турбину с относительно высокой температурой. Действительный цикл такой установки показан на рис.5:

Здесь 1 - 2' - сжатие воздуха в компрессоре;

2' - 5 – нагрев воздуха в регенераторе;

5 – 3 – подвод тепла в процессе сгорания топлива;

- 3 - 4' - расширение газа в турбине;
- 4' - 6 - охлаждение газа в регенераторе;
- 6 - 1 - отвод тепла с выхлопными газами.

Доля тепла уходящих газов, отданная воздуху в регенераторе, называется «степенью регенерации».

**Определение:** степенью регенерации называется отношение количества тепла, фактически воспринятого воздухом в регенераторе при нагреве до  $T_5$ , к тому количеству тепла, которое воздух воспринял бы, нагреваясь до максимально возможной температуры  $T'_4$  (температуры газа на выходе из турбины).

При постоянстве теплоемкости воздуха степень регенерации представится выражением:  $\mu = \frac{T_5 - T_2}{T'_4 - T_2} < 1$

Внутренний КПД газотурбинной установки, работающей по простейшей схеме при наличии регенератора, и полагая  $C_p = \text{пост.}$ :

$$\eta_i = \frac{\eta_T Q_T - \frac{1}{\eta_K} \cdot Q_K}{Q_I}, \text{ где } Q_I = C_p (T_3 - T_5).$$

После преобразований с использованием обычных термодинамических зависи-

$$\text{мостей получаем: } \eta_i = \frac{\eta_T (1 - \sigma^{-m}) - \frac{\tau}{\eta_K} (\sigma^m - 1)}{1 - (1 - \mu) \tau \left[ 1 + \frac{1}{\eta_K} (\sigma^m - 1) \right] - \mu [1 - \eta_T (1 - \sigma^{-m})]}$$

Выражение определения коэффициента полезной работы имеет тот же вид, что и для установки без регенератора:  $\varphi = 1 - \frac{\tau \cdot \sigma^m}{\eta_T \cdot \eta_K}$ .

Схема газотурбинной установки с двумя ступенями сжатия воздуха и одним охладителем дана на рис.6, а соответствующий цикл – на рис.7.

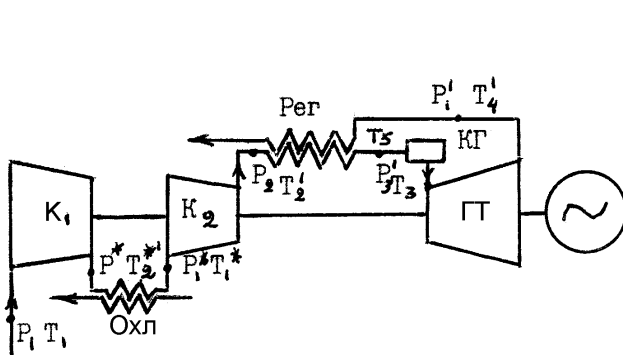


Рис. 6

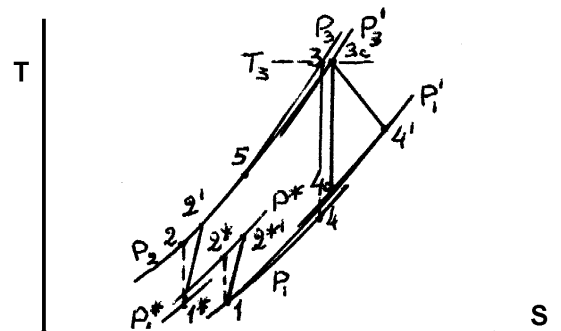


Рис. 7

$K_1$  – первая ступень сжатия;  $K_2$  – вторая ступень сжатия; Охл – охладитель воздуха.

После первой ступени сжатия в компрессоре  $K_1$  воздух при давлении  $P_1^*$  направляется в охладитель, где охлаждается от температуры  $T_2^{*}$  до температуры  $T_1^*$ . При этом, за счет сопротивлений в охладителе давление воздуха падает с величины  $P^*$  до  $P^{*}$ .

Далее идет сжатие воздуха в компрессоре  $K_2$  до конечного давления.

Обозначения и соотношения основных величин цикла:

$$\text{степень сжатия в первом компрессоре } K_1 \quad \sigma' = \frac{P^*}{P_1};$$

$$\text{степень сжатия во втором компрессоре } K_2 \quad \sigma'' = \frac{P_2}{P_1^*};$$

$\eta_{K1}$  и  $\eta_{K2}$  – соответственно, внутренние КПД первого и второго компрессоров;

$$\text{коэффициент потери напора в промежуточном охладителе } v_o = \frac{P^*}{P_1^*};$$

$$\text{соотношения температур } \tau = \frac{T_1}{T_3}; \quad \tau^* = \frac{T_1^*}{T_3}.$$

Внутренний КПД газотурбинной установки данной схемы определится из выражения

$$\eta_i = \frac{\eta_T \cdot \eta_c \cdot Q_T - \frac{1}{\eta_{K1} \cdot \eta_c^*} \cdot Q_{K1} - \frac{1}{\eta_{K2}} \cdot Q_{K2}}{Q_1}, \text{ где}$$

$$Q_T = C_p \cdot (T_3 - T_4), \quad Q_{K1} = C_p \cdot (T_2^* - T_1), \quad Q_{K2} = C_p \cdot (T_2 - T_1^*), \quad Q_1 = C_p \cdot (T_3 - T_5).$$

Коэффициент уменьшения располагаемой работы  $\eta_c$  определяется по аналогии со схемой с регенератором, но без промежуточного охладителя воздуха.

Коэффициент  $\eta_c^*$  учитывает уменьшение полезной работы сжатия воздуха в первом компрессоре за счет потери давления в промежуточном охладителе и

$$\text{может быть найден из выражения: } \eta_c^* = \frac{\sigma'^m - 1}{v_o^m \cdot \sigma'^m - 1}.$$

Используя приведенные зависимости для преобразования формулы по определению  $\eta_i$  можно получить выражение для производства конкретных расчетов. Коэффициент полезной работы может быть найден (после соответствующих преобразований) из выражения:

$$\varphi = 1 - \frac{\frac{Q_{K1}}{\eta_{K1} \cdot \eta_c^*} + \frac{Q_{K2}}{\eta_{K2}}}{\eta_T \cdot \eta_c \cdot Q_T}$$

По аналогии могут быть получены расчетные формулы при наличии большего количества ступеней сжатия и промежуточных охладителей воздуха.

Производившиеся расчеты показали, что введение двухступенчатого сжатия при  $\mu = 0,65$  и при оптимальной степени сжатия увеличивает  $\eta_i$  газотурбинной

установки примерно на 10 % в относительных величинах (то есть рост КПД, как пример, будет с 20 до 22 %).

При переходе от двух ступеней сжатия к трем при том же значении  $\mu$  даст увеличение КПД еще примерно на 4 %.

При переходе от трех ступеней сжатия к четырем КПД возрастает еще примерно на 2 % и т.д. Таким образом, дополнительная постановка каждого следующего охладителя дает все уменьшающийся эффект.

Как показывают расчеты, увеличение числа ступеней сжатия свыше трех нерентабельно, так как при незначительном росте КПД возрастают стоимость, вес и габариты установки, увеличивается расход воды на охлаждение в воздухоохладителях. Поэтому целесообразно применять двух- максимум трехступенчатое сжатие воздуха в компрессорах.

Увеличение числа ступеней сжатия приводит к ощутимому уменьшению удельного расхода газа. При исходных данных, принятых выше, с переходом от одноступенчатого сжатия к двухступенчатому удельный расход газа уменьшается примерно на 20 %, от двухступенчатого к трехступенчатому – еще на 8 % и т.д.

Схема газотурбинной установки с одной промежуточной камерой горения дана на рис.8.

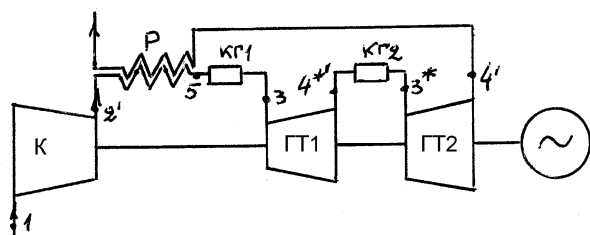


Рис. 8

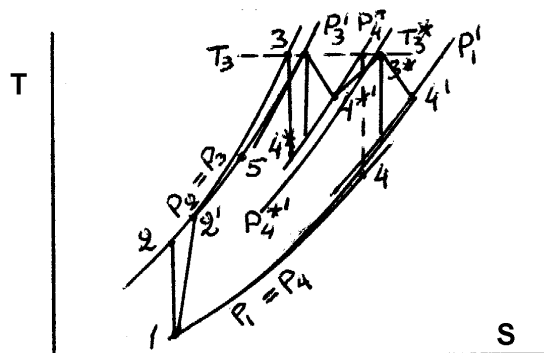


Рис.9

Здесь КГ1 – первая камера горения, КГ2 – вторая (промежуточная), ГТ1 и ГТ2 – первая и вторая газовые турбины.

Остальные обозначения аналогичны принятым в ранее рассмотренных вариантах. На рис.9 показан цикл данной газотурбинной установки.

Обозначения и соотношения основных величин цикла:

степень расширения в первой турбине ГТ1  $\sigma_1 = \frac{P_3}{P_4^*};$

степень расширения во второй турбине ГТ2  $\sigma_2 = \frac{P_4^*}{P_4};$

$\eta_{Г1}$  и  $\eta_{Г2}$  – соответственно, внутренние КПД первой и второй турбин;

коэффициент потери напора в промежуточной камере горения КГ2  $v^* = \frac{P_4^*}{P_4^{*'}};$

соотношения температур  $\tau = \frac{T_1}{T_3}; \tau_1 = \frac{T_3^*}{T_3}.$

Остальные обозначения – по аналогии с предыдущими вариантами.

Внутренний КПД газотурбинной установки данной схемы определится из выражения:

$$\eta_i = \frac{\eta_{T1} \cdot \eta_{c1} \cdot Q_{T1} + \eta_{T2} \cdot \eta_{c2} \cdot Q_{T2} - \frac{1}{\eta_K} \cdot Q_K}{Q_1 + Q_1'}$$

соответственно  $\phi$  и  $d$ :

$$\phi = 1 - \frac{\frac{Q_K}{\eta_K}}{\eta_{T1} \cdot \eta_{c1} \cdot Q_{T1} + \eta_{T2} \cdot \eta_{c2} \cdot Q_{T2}}; \quad d = \frac{3600}{(Q_1 + Q_1') \cdot \eta_s} \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$$

где  $Q_{T1} = C_p \cdot (T_3 - T_4^*),$

$Q_{T2} = C_p \cdot (T_3^* - T_4),$

$Q_1' = C_p \cdot (T_3^* - T_4^{*'}).$

$Q_K$  и  $Q_T$  – по аналогии с предыдущими вариантами.

$T_3$  – температура газа перед первым отсеком турбины;

$T_4^{*'}$  - температура газа за первым отсеком турбины;

$T_3^*$  и  $T_4'$  - то же, для второго отсека турбины;

$Q_1$  и  $Q_1'$  - количество тепла, подведенного в первой и второй камерах сгорания.

$\eta_{c1}$  – коэффициент уменьшения располагаемой работы для первого отсека

$$\eta_{c1} = \frac{1 - v_1^m \cdot \sigma_1^{-m}}{1 - \sigma_1^{-m}}, \text{ где } v_1 = \frac{P_3}{P_3'} - \text{коэффициент потери напора в первом отсеке};$$

$\eta_{c2}$  – коэффициент уменьшения располагаемой работы для второго отсека, учитывающий потери напора по газовой стороне регенератора, и во второй камере горения.

$$\eta_{c2} = \frac{1 - v_2'^m \cdot \sigma_2^{-m}}{1 - \sigma_2^{-m}}, \text{ где } v_2' = v^* \cdot v_2, \text{ а } v_2 = \frac{P_1'}{P_1}.$$

По расчетам постановка одной промежуточной камеры горения дает увеличение КПД установки примерно на 10 % в относительных величинах, двух – еще дополнительно на 4 % и т.д. Уменьшение удельного расхода газа составляет, соответственно, примерно 20 % и 8 %.

Практически в газотурбинных установках ставится одна промежуточная камера горения, так как это дает приемлемый рост КПД и уменьшение удельного расхода газа при относительной простоте схемы и ограниченном количестве элементов с высокой температурой газа, требующих особого внимания для обеспечения надежной и долговечной работы.

Газотурбинная установка со ступенчатым сжатием воздуха и ступенчатым подводом тепла при наличии регенерации

Простейшая схема такой установки с одним промежуточным охладителем и одной промежуточной камерой горения дана на рис.10, а соответствующий цикл с учетом всех потерь давления на рис.11.

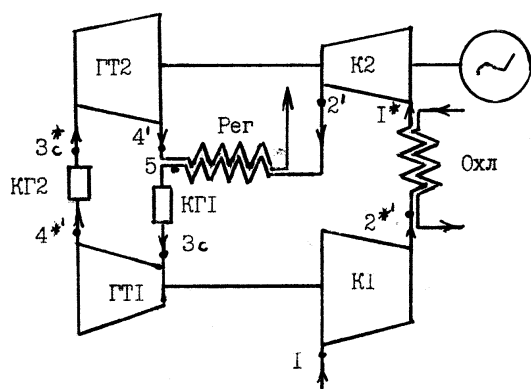


Рис. 10

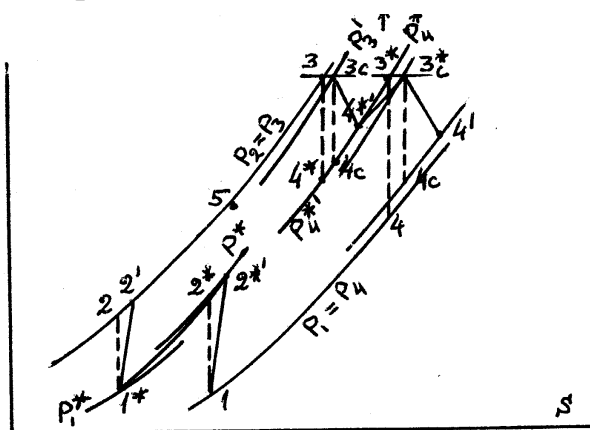


Рис. 11

Исходные формулы для определения основных характеристик:

$$\eta_i = \frac{\eta_{T1} \cdot \eta_{c1} \cdot Q_{T1} + \eta_{T2} \cdot \eta_{c2} \cdot Q_{T2} - \frac{Q_{K1}}{\eta_{K1} \cdot \eta_c^*} - \frac{Q_{K2}}{\eta_{K2}}}{Q_1 + Q'_1}$$

$$\varphi = 1 - \frac{\frac{Q_{K1}}{\eta_{K1} \cdot \eta_c^*} + \frac{Q_{K2}}{\eta_{K2}}}{\eta_{T1} \cdot \eta_{c1} \cdot Q_{T1} + \eta_{T2} \cdot \eta_{c2} \cdot Q_{T2}}; \quad d = \frac{3600}{(Q_1 + Q'_1) \cdot \eta_s} \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$$

Практические рекомендации по повышению эффективности работы газотурбинных установок:

при мощностях до 5-6 МВт – простая схема без регенератора или с регенератором;

в установках средней мощности от 5-6 МВт до 18-20 МВт – увеличение экономичности за счет одного промежуточного охладителя и регенератора;

применение одновременно промежуточных охладителей (до двух), одной промежуточной камеры горения и регенератора целесообразно только для газотурбинных установок большой мощности, начиная от 20 МВт и выше.

Газотурбинные установки, кроме выработки электроэнергии, могут быть использованы и для отпуска тепла.

Возможны варианты:

постановка газового водонагревателя за регенератором;

отказ от регенератора и замена его газовым водонагревателем;

предварительный подогрев подпиточной сетевой воды в промежуточных охладителях воздуха.

Основной недостаток этих вариантов – громоздкость газовых водонагревателей, их большая металлоемкость.

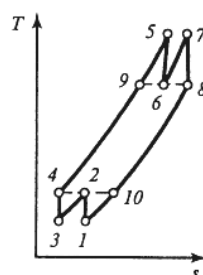
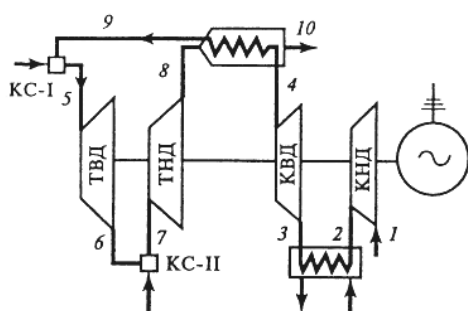
### Решение задач

Указания.

Записать краткое условие задачи, перевести исходные данные в систему СИ.

При расчете циклов газотурбинных установок следует изобразить рассматриваемый цикл в  $T,s$ -диаграмме. Далее определяются температуры в характерных точках цикла и неизвестные (по условию) величины.

### Задача



Рассчитайте теоретический цикл ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией.

Параметры воздуха на входе в компрессор:

$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , степе-

нь повышения давления в обеих ступенях одинакова:  $\beta_1 = \beta_2 = 2,4$ , охлаждение воздуха после первого компрессора производится до  $t_3 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Давление воздуха после первой турбины  $0,24 \text{ МПа}$ , расход воздуха  $250000 \text{ кг/ч}$ . Определите параметры всех точек цикла, термический КПД и теоретическую мощность ГТУ.

### Решение.

1. Определяем температуры в узловых точках цикла.
2. Определяем термический КПД.
3. Определяем теоретическую мощность двух турбин.
4. Определяем теоретическую мощность двух компрессоров.
5. Определяем теоретическую мощность ГТУ.

## 4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ



#### 4.1. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы

Самостоятельная работа предусматривает:

- подготовку студентов к аудиторным лекционным и практическим занятиям;

Для усвоения дисциплины необходима систематическая самостоятельная работа, контроль которой осуществляется с помощью графика самостоятельной работы (табл. 1).

Темы аудиторных лекционных и практических занятий; рекомендуемая литература приведены в рабочей программе дисциплины и настоящем учебно-методическом комплексе.

#### 4.2. График самостоятельной работы студентов

Таблица 1

№	Содержание	Объем в часах	Формы контроля	Сроки (недели)
1	2	3	4	5
1	подготовка к лекционным занятиям	2	Проверочная работа	1
2	подготовка к лекционным занятиям	2	Блиц-опрос на лекции.	2
3	подготовка к лекционным и практическим занятиям	3	Блиц-опрос на лекции.	2, 3
4	подготовка к лекционным и практическим занятиям	3	Блиц-опрос на лекции.	4
5	подготовка к лекционным занятиям	2	Проверочная работа	5
6	подготовка к лекционным и практическим занятиям	4	Блиц-опрос на лекции.	6
7	подготовка к лекционным и практическим занятиям	3	Блиц-опрос на лекции.	7
8	подготовка к лекционным занятиям	2	Блиц-опрос на лекции.	8
9	подготовка к лекционным занятиям	2	Блиц-опрос на лекции.	9
10	подготовка к лекционным занятиям	3	Проверочная работа	10
11	подготовка к лекционным и практическим занятиям	3	Блиц-опрос на лекции.	11
12	подготовка к лекционным и практическим занятиям	4	Блиц-опрос на лекции	12
13	подготовка к лекционным и практическим занятиям	3	Блиц-опрос на лекции.	13
14	подготовка к лекционным занятиям	2	Проверочная работа	14

15	подготовка к лекционным занятиям	2	Блиц-опрос на лекции.	15
----	----------------------------------	---	-----------------------	----

### 4.3. Комплекты заданий для проверочных работ

#### Проверочная работа № 1 «Расчет циклов ГТУ»

1. Компрессор газотурбинной установки сжимает воздух с начальными параметрами  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 5$  °С до давления  $p_2 = 0,8$  МПа. Внутренний относительный КПД компрессора равен 0,84.

Определите температуру воздуха на выходе из компрессора и также мощность привода компрессора  $N_k$ , если известно, что компрессор должен подавать  $1 \cdot 10^5$  кг/ч воздуха.

2. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при  $p = const$ ,  $p_1 = 0,1$  МПа;  $t_1 = 20$  °С. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ  $\beta = 6$ . Температура газов перед соплами турбины  $t_3 = 700$  °С. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость его рассчитывается по молекулярно-кинетической теории. Компрессор засасывает  $2 \cdot 10^5$  кг/ч воздуха. Определите:

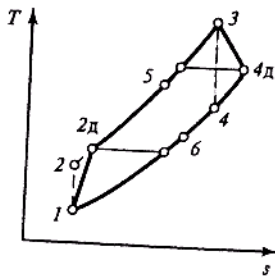
- Параметры всех точек идеального цикла ГТУ, термический КПД ГТУ, теоретические мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.
- Параметры всех точек действительного цикла (с учетом необратимости процессов расширения и сжатия в турбине и компрессоре), приняв внутренние относительные КПД турбины и компрессора соответственно  $\eta_{oi}^T = 0,87$  и  $\eta_{oi}^K = 0,85$ .
- Внутренний КПД ГТУ, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ. Представьте оба цикла в  $T$ -,  $s$ -диаграмме.

3. Газотурбинная установка, в которой топливо сгорает при  $p = const$ , работает при следующих параметрах:  $p_1 = 0,09$  МПа,  $t_1 = 12$  °С, степень повышения давления  $\beta = 7$ , температура газов перед соплами турбины равна 750 °С. Внутренние относительные КПД турбины и компрессора:  $\eta_{oi}^T = \eta_{oi}^K = 0,8$ .

Вторая установка работает при тех же параметрах, но за счет улучшения проточных частей турбины и компрессора внутренние относительные КПД были повышены до значений  $\eta_{oi}^T = \eta_{oi}^K = 0,85$ .

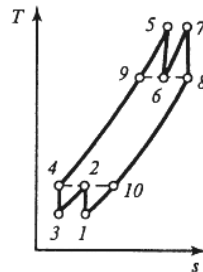
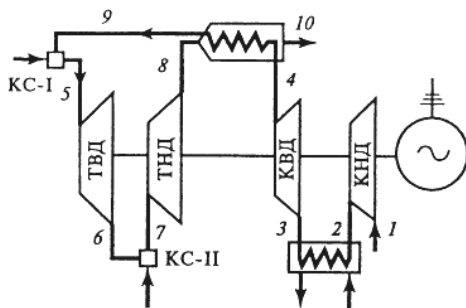
Рассчитайте значения внутренних КПД первой и второй ГТУ, выяснив тем самым влияние качества процессов сжигания и расширения на КПД установки. Приняв показатель адиабаты  $k = 1,4$ . Определите также термический КПД установки.

#### Проверочная работа № 2 «Методы повышения КПД ГТУ»



1. Газотурбинная установка, работающая по циклу с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ , работает с непределенной регенерацией. Параметры установки:  $\beta = 4,8$ ,  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = 780^\circ\text{C}$ , степень регенерации  $\sigma = 0,75$ , внутренние относительные КПД турбины и компрессора  $\eta_{oi}^T = 0,85$  и  $\eta_{oi}^K = 0,83$ . Рассчитайте внутренний КПД такой установки. Считайте, что рабочее тело обладает свойствами воздуха. Показатель адиабаты  $k$  принять равным 1,4.

2. Рассчитайте теоретический цикл ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией.

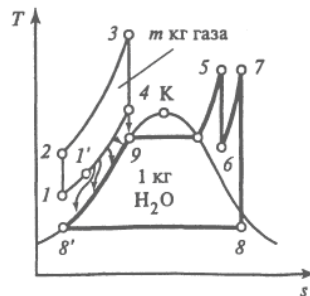
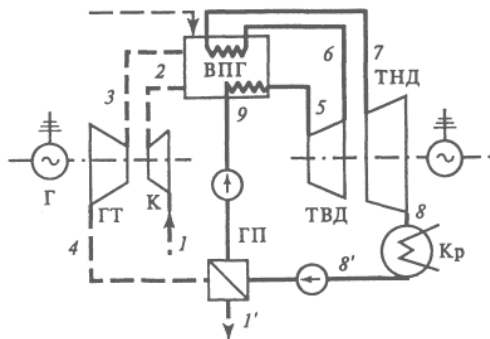


с двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией. Параметры воздуха на входе в компрессор:

$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , степень повышения давления в обеих ступенях одинакова:  $\beta_1 = \beta_2 = 2,4$ , охлаждение воздуха после первого компрессора производится до  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ .

Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна  $800^\circ\text{C}$ . Давление воздуха после первой турбины  $0,24 \text{ МПа}$ , расход воздуха  $250000 \text{ кг/ч}$ . Определите параметры всех точек цикла, термический КПД и теоретическую мощность ГТУ.

### Проверочная работа № 3 «Парогазовые установки в ВПГ»



Парогазовая установка работает по следующей схеме: воздух из атмосферы (состояние 1) сжимается компрессором (состояние 2) и подается в топочное устройство высоконапорного парогенератора ВПГ, где сгорает топливо. Продукты сгорания сначала отдают часть своей теплоты нагретой до температуры кипения воде и водяному пару, циркулирующим в особом контуре, а затем направляются в газовую турбину ГТ (состояние 3), в которой изоэн-

тропическое расширение. Пар из ВПГ расширяется в паровой турбине (состояние 4) и конденсируется в конденсаторе (состояние 5). Водяной пар из конденсатора насосом (состояние 6) подается в ВПГ. Водяной пар из ВПГ расширяется в паровой турбине (состояние 7) и конденсируется в конденсаторе (состояние 8). Водяной пар из конденсатора насосом (состояние 8') подается в ВПГ. Водяной пар из ВПГ расширяется в паровой турбине (состояние 9) и конденсируется в конденсаторе (состояние 9'). Водяной пар из конденсатора насосом (состояние 10) подается в ВПГ.

тропно расширяясь, совершают полезную работу. Отработавшие газы (состояние 4) идут в газовый подогреватель ГП и нагревают в нем конденсат водяного пара до температуры кипения (состояние 9), после чего выбрасываются в атмосферу (состояние 1). Кипящая вода из подогревателя ГП направляется в парогенератор ВПГ, где испаряется и перегревается (состояние 5). Перегретый пар, отработав в турбине высокого давления ТВД (состояние 6), снова перегревается за счет теплоты топочных газов ВПГ (состояние 7), затем работает в турбине низкого давления ТНД (состояние 8) и конденсируется в конденсаторе *Kp*. Водяной цикл, таким образом, замыкается.

Рассчитайте термический КПД идеального бинарного парогазового цикла, если известны следующие параметры:

Газ:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ;  $t_3 = 800^\circ\text{C}$ ;  $t_4 = 120^\circ\text{C}$ ;  $\beta = p_2/p_1 = 8$ .

Вода и водяной пар:  $p_5 = 1,3 \text{ МПа}$ ;  $t_5 = 565^\circ\text{C}$ ;  $p_6 = p_7 = 3,0 \text{ МПа}$ ;  $t_7 = 565^\circ\text{C}$ ;  $p_8 = 30 \text{ гПа}$ .

Найдите отношение этого КПД и КПД цикла Карно для максимальной и минимальной температур бинарного цикла.

Газ считать обладающим свойствами воздуха, теплоемкость газа  $c$  считать постоянной. Работой водяных насосов пренебречь.

## 5. МАТЕРИАЛЫ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

### 5.1. Методические указания по организации контроля знаний студентов

Важнейшей составляющей изучения дисциплины является контроль знаний студентов, в том числе тестовый контроль качества освоения профессиональной образовательной программы (проверка остаточных знаний). Приведенные ниже комплекты заданий позволяют оценить степень усвоения теоретического материала и практических навыков и умений по термодинамике в рамках учебной программы для энергетических специальностей вузов.

Предусмотрены следующие виды контроля знаний студентов:

#### ***Входной контроль***

Входной контроль по дисциплине представляет собой задания, позволяющие оценить знание понятий, определений и закономерностей, используемых в данной дисциплине и изучаемых ранее в других курсах, т.е. подготовленность студентов для освоения данной дисциплины.

#### ***Межсессионный контроль***

Межсессионный контроль включает теоретические задания по изучаемым темам, выполнение проверочных работ, выполнение домашних расчетных заданий, выполнение и защиту курсовой работы. Текущий контроль осуществляется систематически в течение семестра (см. график самостоятельной работы), по

результатам контроля выставляется промежуточная аттестация (контрольные точки), экзаменационная оценка по дисциплине выставляется с учетом результатов межсессионного контроля.

### ***Экзаменационный контроль***

Итоговой формой контроля знаний студентов является экзамен. В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по пятибалльной системе. Опрос студентов осуществляется в письменно-устной форме. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса по изученному курсу и задачу (каждый вопрос и задача – по разным темам дисциплины). Для подготовки ответа на вопросы и решения задачи дается 40 мин.

### ***Контроль остаточных знаний***

Проверка качества освоения профессиональной образовательной программы осуществляется после изучения дисциплины в виде тестирования.

## **5.2. Критерии оценки знаний студентов**

### ***Входной контроль, межсессионный контроль (теоретические задания) и контроль остаточных знаний***

Знания оцениваются по четырехбалльной шкале.

*Отлично* – не менее 85% правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 75% правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50% правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50% правильно выполненных заданий.

### ***Межсессионный контроль (проверочные работы)***

Каждая проверочная работа включает две задачи. Практические умения решения задач оцениваются по четырех балльной шкале.

*Отлично* – правильно решены обе задачи. *Хорошо* – одна задача решена правильно, при решении второй задачи допущены ошибки (задача не решена до конца, неправильно найдены некоторые величины) или решение обеих задач содержит ошибки не принципиального характера. *Удовлетворительно* – правильно решена одна задача или решение обеих задач содержит принципиальные ошибки. *Неудовлетворительно* – обе задачи решены неверно.

### ***Экзаменационный контроль***

Итоговая аттестация по дисциплине включает рейтингово-модульную систему оценки знаний студентов в следующем соотношении: промежуточный контроль знаний студентов составляет 30 %, остальные 70 % определяются результатами итогового экзамена.

В ответах студентов на экзамене знания и умения оцениваются по четырехбалльной шкале.

Оценка «отлично» ставится в случае правильных и полных ответов на оба теоретические вопросы билета и правильного решения задачи.

Оценка «хорошо» ставится в случае:

- правильного, но неполного ответа на один из теоретических вопросов билета, требующего уточняющих дополнительных вопросов со стороны преподавателя или ответа, содержащего ошибки не принципиального характера, которые студент исправляет после замечаний (дополнительных вопросов) преподавателя; правильного решения задачи;

- правильных и полных ответа на оба теоретических вопроса билета; затруднений при решении задачи, с которыми студент справляется после помощи преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» ставится в случае:

- ответов, содержащего ошибки принципиального характера на теоретические вопросы билета; правильного решения задачи;

- неверного ответа (отсутствия ответа) на один из теоретических вопросов билета; решения задачи после незначительной помощи преподавателя;

- правильных и полных ответов на оба теоретических вопроса билета; неверного решения задачи (не справился с задачей после помощи преподавателя).

Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае:

неверных ответов (отсутствия ответов) на оба теоретических вопроса билета;

неверного ответа (отсутствия ответов) на один из теоретических вопросов билета и неверного решения задачи.

### **5.3. Фонды тестовых заданий**

#### ***Входной контроль***

Термический КПД цикла определяется ...

Паротурбинный цикл представляет собой...

Тепловая электрическая станция это...

Основными элементами турбины являются...

Регенеративный подогрев предназначен...

Теплообменные аппараты это...

#### ***Межсессионный контроль***

##### **Задания для текущей проверки знаний**

##### *По теме № 1*

1. Газотурбинная установка – это ...

2. Воздушный компрессор – это ..., он состоит из ...

3. Камеры сгорания ГТУ бывают ...

4. Основные элементы газовой турбины ...

5. Система охлаждения газовой турбины включает в себя ...

#### *По теме № 5*

1. Парогазовая установка – это ...
2. Преимуществом использования парогазовых установок по сравнению с паротурбинными является ...
3. По принципу взаимодействия рабочих тел парогазовых установок можно выделить следующие схемы ...
4. Основными типами паротурбинных установок являются ...

#### **Экзаменационный контроль**

##### Вопросы к экзамену

1. Устройство газотурбинных установок
2. Циклы газотурбинных установок с подводом количества теплоты в процессе  $v=const$  и  $p=const$ .
3. Регенеративный подогрев воздуха на входе в камеру сгорания ГТУ
4. Применение многоступенчатого сжатия воздуха в компрессоре и многоступенчатого подвода тепла в ГТУ
5. Методика расчета энергетических показателей ГТУ и их анализ при переменном режиме работы.
6. Использование ГТУ в качестве пиковых установок
7. Основные факторы, влияющие на экономичность ГТУ
8. Пусковые и переменные режимы работы, системы управления ГТУ
9. Использование ГТУ на АЭС
10. Парогазовые установки: основные понятия, классификация, основные схемы
11. ПГУ с утилизационными паровыми котлами
12. ПГУ с высоконапорным парогенератором
13. ПГУ со сбросом уходящих газов ГТУ в топку парового котла
14. Использование парогазовых схем для модернизации энергетических паросиловых блоков путем их надстройки газовыми турбинами.
15. Использование технологии внутрицикловой газификации угля для создания ПГУ с утилизационными паровыми котлами
16. ПГУ с котлом с циркуляционным кипящим слоем (ЦКС) для сжигания низкосортных углей
17. Методика расчета показателей ПГУ при переменных режимах
18. Использование ПГУ при проектировании ТЭС с высокими экологическими показателями.
19. КИП, автоматические регуляторы и технологические защиты в схемах парогазовых установок.

#### **Контроль остаточных знаний**

##### Пример тестовых заданий для проверки остаточных знаний

*Инструкция:* При ответе следует выбрать один ответ из предложенных. Результаты тестирования оценивают по 4-х балльной шкале (*отлично* – не менее 85 % правильно выполненных заданий; *хорошо* – не менее 70 % правильно выполненных заданий; *удовлетворительно* – не менее 50 % правильно выполненных заданий; *неудовлетворительно* – менее 50 % правильно выполненных заданий)

1. Газотурбинная установка это -

- а) установка, состоящая из компрессора, камеры сгорания и газовой турбины;
- б) установка, включающая в себя паровой котел и газовую турбину;
- в) установка, работающая по циклу Ренкина.

2. Степень регенерации это –

- а) полезная удельная работа ГТУ;
- б) отношение количества тепла, фактически воспринятого воздухом в регенераторе, к тому количеству тепла, которое воздух воспринял бы, нагреваясь до максимально возможной температуры;
- в) Коэффициент, характеризующий степень сжатия в компрессоре.

3. Система воздушного охлаждения – это

- а) система охлаждения в газа на выходе из турбины;
- б) в которой применяется вторичное охлаждение воздуха перед компрессором;
- в) в которой применяется цикловой воздух компрессора, отбираемый из различных отсеков его проточной части.

4. Выберите основные пути повышения термодинамической эффективности ГТУ

- а) регенеративный подогрев воздуха на входе в камеру сгорания
- б) регенеративный подогрев воздуха на входе в компрессор
- в) применение многоступенчатого сжатия воздуха в компрессоре
- г) применение многоступенчатого подвода тепла

5. Парогазовые установки - это

- а) установка, состоящая из двух отдельных установок: паросиловой и газотурбинной
- б) бинарный цикл, в качестве рабочего тела используется парогазовая смесь
- в) установка, в которой применяется вместо паровой газовой турбина

6. Контактные схемы – это

- а) схемы, в которых продукты сгорания, образовавшиеся в камере сгорания смешиваются с пароводяным рабочим телом



б) схемы, в которых используются теплообменники контактного типа

## **6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Турбины тепловых и атомных электрических станций. М.: Издательство МЭИ, 2001.

2. С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М. Издательство МЭИ, 2002.

3. Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. Учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2002 – 540 с. 15 экз.

## Содержание

Аннотация	3
1. Цели и задачи дисциплины, ее связь с другими курсами специальности	4
2. Краткий конспект лекций	5
3. Практические занятия	
3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий	7
3.2. Перечень тем практических занятий (с указанием объема в часах)	8 8
3.3. План проведения практических занятий	
4. Самостоятельная работа студентов	
4.1. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы	17
4.2. График самостоятельной работы студентов	17
4.3. Комплекты заданий для практических работ	18
5. Материалы по контролю качества образования	
5.1. Методические указания по организации контроля знаний студентов	20
5.2. Критерии оценки знаний студентов	21
5.3. Фонды тестовых заданий	22
6. Список рекомендуемой литературы	25