

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Драгунов В.К.

« 16 » июля 2015 г.



Программа аспирантуры

Направление 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность (специальность) 05.04.12 Турбомашины и комбинированные турбоустановки

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

специальной дисциплины

«Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ОД.2

Всего: 252 часа

Семестр 5, 144 часа, в том числе 6 часов – контактная работа,  
138 часа – самостоятельная работа,

Семестр 6, 108 часов, в том числе 6 часов – контактная работа,  
66 часов – самостоятельная работа,  
36 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки

13.06.01 Электро- и теплотехника,

код и название направления

утвержденного приказом Минобрнауки России от 30 июля 2014 г. № 878, и паспорта специальности, указанной в номенклатуре специальностей научных работников

05.04.12 Турбомашин и комбинированные турбоустановки

шифр и название специальности

утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** освоения дисциплины является изучение автоматизированных систем регулирования энергетических установок, формирование знаний и навыков в области эксплуатации, наладки и настройки автоматизированных систем управления работой и защит энергоблока.

**Задачами** дисциплины являются:

- формирование практических навыков разработки научных основ изучения физико-химических, гидрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов, общих свойств и принципов функционирования отдельных узлов и механизмов, а также основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок
- освоение физических исследований и математического моделирования рабочего ресурса турбомашин и комбинированных турбоустановок;
- получение практических навыков математического моделирования и исследования динамики и прочности элементов и деталей турбомашин и комбинированных турбоустановок;
- освоение систем автоматического регулирования, управления, защиты турбомашин и комбинированных турбоустановок;
- освоение мониторинга и диагностики технического состояния основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок.

**В процессе освоения дисциплины формируются следующие компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерирование новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

- способность планировать и осуществлять комплексные исследования (УК-2);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- способность следовать этическим нормам в профессиональной деятельности (УК-5);
- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6);
- владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1);
- владение культурой научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ОПК-2);
- способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3);
- готовность организовать работу исследовательского коллектива в профессиональной деятельности (ОПК-4);
- владение методами теоретических и экспериментальных исследований в области турбиностроения (ПК-1);
- способность к разработке новых методов исследования и их применение в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области газодинамики и надежности турбомашин и комбинированных турбоустановок (ПК-3);
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования при решении проблем совершенствования паротурбинных установок (ПК-4);
- готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации в области турбиностроения на государственном и иностранном языках (ПК-6).

### **ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

**знать:**

- принципиальные схемы и тепловые циклы паро-, газотурбинных и комбинированных установок для электростанций, использующих органическое и ядерное топливо (УК-1);
- основные аналитические решения классических задач гидродинамики и газовой динамики (УК-2);

- принцип работы отдельных узлов и механизмов, а также основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок (УК-6);
- методы изучения прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок (ОПК-1);
- системы автоматического регулирования, управления, защиты турбомашин и комбинированных турбоустановок (ПК-4).

**уметь:**

- исследовать и проводить испытания турбинного оборудования и его элементов (ОПК-3);
- проектировать паровые, газовые и парогазовые турбинные агрегаты и установки, включая вспомогательное оборудование турбоустановок (УК-3);
- разрабатывать и применять компьютерные технологии в турбомашинах и комбинированных турбоустановках и вспомогательном турбинном оборудовании (УК-5);
- работать с научно-технической литературой, в том числе с иностранной, анализировать и критически использовать представленные в ней материалы (ОПК-2);
- использовать программные средства компьютерной графики и визуализации результатов научно-исследовательской деятельности, оформлять отчеты с помощью современных офисных информационных технологий, текстовых и графических редакторов, средств печати, в соответствии с нормативными документами (ОПК-4).

**владеть:**

- методами проектирования турбомашин и комбинированных установок (ПК-6);
- методами теоретических и экспериментальных исследований в области турбиностроения (ПК-1);
- навыками создания компьютерных моделей элементов конструкций (ПК-4);
- навыками численного решения классических и прикладных задач газодинамики в специализированных программных комплексах (ПК-3).

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1. Тепловые циклы турбинных установок (12 часов, 5 семестр)**

Принципиальные схемы и тепловые циклы паро- и газотурбинных установок для электростанций, использующих органическое и ядерное топливо. Комбинированные циклы и схемы парогазовых установок. Тепловая эффективность установок и методы ее повышения. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии. Перспективные циклы и схемы турбинных и комбинированных установок для электростанций на органическом и ядерном топливе.

## 2. Механика жидкости и газа (ПК-3, ПК-4) (36 часов, 5 семестр)

Кинематика сплошной среды. Движение малой частицы жидкости и теорема Гельмгольца о движении жидкости в общем случае. Потенциальные и вихревые движения в жидкости. Линия тока и вихревая линия. Методы изучения движения жидкости. Циркуляция скорости. Формула Био-Савара.

Основные уравнения движения жидкости. Уравнение неразрывности. Уравнение расхода. Уравнения движения в форме Эйлера, Громеко-Лэмба и Навье-Стокса. Интегральные уравнения движения для идеальной жидкости. Уравнение энергии и его формы.

Одномерная схема течения. Уравнения одномерного течения. Параметры полного торможения. Скорость звука и критическая скорость. Связь безразмерных параметров потока с безразмерными скоростями  $M$  и  $\lambda$ . Критические параметры. Условия перехода через скорость звука. Приведенный расход и удельный приведенный расход. Газодинамические функции. Осреднение неравномерных потоков и приведение их к одномерной схеме течения.

Потенциальные течения. Плоские потенциальные течения несжимаемой жидкости. Комплексные потенциалы элементарных потоков и их использование для расчетов потенциальных течений. Уравнение для расчета скорости в сжимаемом потоке. Уравнение Н.Е. Жуковского о подъемной силе. Постулат Чаплыгина-Жуковского.

Сверхзвуковые течения. Особенности сверхзвуковых потоков. Характеристики в плоскости течения и в плоскости годографа скорости. Диаграмма характеристик и ее использование для сверхзвуковых потоков. Возникновение скачков уплотнений. Прямой скачок уплотнения и его расчет. Диаграмма ударных поляр. Потери энергии в скачках уплотнения.

Истечение из сопел и непрофилированных отверстий. Переменные режимы суживающихся сопел. Сопло Лаваля и диаграмма переменных режимов сопел Лаваля. Профилированные сопла Лаваля. Истечение из непрофилированных отверстий. Коэффициенты расхода при истечении из щелей с острой кромкой.

Теория подобия и размерностей. Задачи теории подобия. Коэффициенты подобия и числа подобия. П-теорема. Условие физического подобия течения.

Критерии подобия. Полное и частичное моделирование.

Течение вязкой жидкости. Точные решения уравнений Навье-Стокса. Ламинарный и турбулентный типы течения. Способы осреднения турбулентных потоков и их основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Пограничный слой. Пути решения уравнений для погранично слоя. Модели турбулентности. Отрыв пограничного слоя и пути его предотвращения. Численные решения задач МЖГ.

Течение двухфазных и двухкомпонентных сред. Особенности двухфазных течений. Гомогенное течение с постоянной концентрацией второй фазы. Гомогенное течение жидкости с пузырьками газа. Течение двухфазной среды при фазовом равновесии или полном переохлаждении. Тепловые скачки и скачки конденсации.

### **3. Степень турбомашин (16 часов, 5 семестр)**

Преобразование энергии в ступенях турбины и компрессора. Расчет турбинной и компрессорной ступеней. Особенности проектирования: ступеней большой верности. Ступени скорости, радиальные, радиально-осевые и диагональные ступени. Двухъярусные ступени. Коэффициент полезного действия (КПД) турбинной и компрессорной ступени. Основные виды потерь в ступени. Влияние основных геометрических и режимных параметров на КПД. Степень реактивности и коэффициент расхода ступени. Влияние влажности и охлаждения на основные характеристики ступени паровой и газовой турбины.

### **4. Решетки турбомашин (20 часов, 5 семестр)**

Турбинные и компрессорные решетки, их классификация. Геометрические и аэродинамические характеристики решеток турбомашин. Методы плоского, осесимметричного и пространственного расчета решеток. Профильные и концевые потери в решетках, методы их расчета. Решетки паровых турбин для влажного пара. Процессы неравновесного влагообразования в решетках. Основные особенности движения переохлажденного и влажного пара в решетках паровых турбин. Нестационарные течения решетках турбомашин. Переменные, аэродинамические силы. Вынужденные и самовозбуждающиеся колебания рабочих лопаток турбины компрессора. Флаттер и помпаж. Вращающийся отрыв в решетках турбомашин. Пульсации давления в потоках влажного пара, нестационарные скачки конденсации.

### **5. Многоступенчатые турбины (20 часов, 5 семестр)**

Тепловой процесс в многоступенчатой турбине. Преимущества и недостатки многоступенчатых турбин. Выбор конструкции и ремонт многоступенчатых турбин. Предельная мощность однопоточной паровой и газовой турбины. Пути повышения предельной мощности турбины.

Выбор частоты вращения, числа валов и цилиндров паровой турбины. Технико-экономические основы выбора конструкции турбины. Осевые усилия в турбинах, их расчет и методы уравнивания. Концевые уплотнения. Регулирующие клапаны, впускные и выхлопные патрубки турбин. Эрозия рабочих лопаток. Защита элементов проточной части от эрозии. Сепарация влаги из проточной части паровой турбины. Выносные сепараторы-пароперегреватели турбин атомных электростанций (АЭС).

### **6. Расчет и проектирование многоступенчатых компрессоров (20 часов, 5 семестр)**

Многоступенчатый осевой компрессор. Влияние потерь в патрубках на КПД и напор компрессора. Неустойчивые режимы в работе компрессора. Универсальная характеристика. Моделирование компрессоров. Многоступенчатые центробежные компрессоры. Выбор оптимальных геометрических размеров ступеней центробежного компрессора. Профилирование рабочих колес и лопаточных диффузоров.

### **7. Переменный режим работы турбин (20 часов, 5 семестр)**

Газодинамическое подобие. Переменный режим работы ступени. Обобщенные характеристики турбинных ступеней. Распределение давлений по ступеням при изменении режима работы турбины. Влияние изменения режима работы на КПД турбины. Особенности работы последних ступеней конденсационной турбины при изменении объемного пропуска пара. Система парораспределения. Изменение нагрузки паровой турбины методом скользящего давления. Методы расчета турбин при переменном режиме работы. Загрязнение проточной части.

Переменный режим работы газотурбинной установки (ГТУ). Способы изменения режима работы ГТУ. Согласование режимов работы турбомашин. Представление характеристик методами подобия. Зависимость показателей ГТУ от нагрузки и температуры наружного воздуха, ее цикла и схемы. Диаграмма режимов ГТУ. Режим пуска ГТУ, пусковые устройства.

#### **8. Турбины для комбинированной выработки тепла и электрической энергии (36 часов, 5 семестр) (20 часов, 5 семестр)**

Турбины с противодавлением, с промежуточным регулируемым отбором пара. Ступенчатый подогрев воды. Диаграммы режимов работы турбины. Использование для теплофикации тепла ГТУ и АЭС.

#### **9. Теплообмен в элементах турбомашин (16 часов, 5 семестр)**

Основные уравнения теплопроводности и конвективного теплообмена. Теплообмен при фазовых превращениях. Теплообмен при проникающем охлаждении и газовых завесах. Распределение температуры в охлаждаемых турбинных лопатках, роторах и корпусах. Методы решения задач теплопроводности и теплообмена применительно к основным деталям турбин. Конструкции охлаждаемых лопаток газовых турбин.

#### **10. Динамика и прочность деталей паровых и газовых турбин (36 часов, 5 семестр)**

Надежность турбин как основное требование их изготовления, монтажа и эксплуатации. Материалы, используемые в турбостроении. Условия работы металлов в паровых и газовых турбинах. Свойства сталей и сплавов, применяемых в турбостроении, и требования к ним. Процессы, сопровождающие работу металлов при высоких температурах, длительной эксплуатации и переменных нагрузках. Коррозионная усталость и коррозионное растрескивание под напряжением в элементах турбины под влиянием агрессивных примесей в паре. Коррозия лопаток ГТУ, защитные покрытия. Рабочие лопатки, их вибрационная прочность. Обеспечение вибрационной надежности лопаточного аппарата. Диски, их прочность и вибрации. Вибрации роторов и фундамента. Низкочастотные вибрации роторов. Методика численного анализа и расчета напряженного состояния деталей турбин. Гидродинамические силы в ступенях, уплотнениях и подшипниках. Маневренность турбин. Термические напряжения в деталях турбин, термоусталость.

#### **11. Регулирование турбин (26 часов, 6 семестр)**

Принципиальные схемы регулирования паровых и газовых турбин. Статические характеристики регулирования. Параллельная работа турбогенераторов. Математическое описание системы регулирования турбин. Устойчивость системы регулирования турбин. Переходные процессы в системах регулирования турбин. Использование вычислительной техники для анализа переходных процессов в системе регулирования турбины и синтеза системы регулирования. Механизм управления паровой конденсационной турбиной. Особенности регулирования турбин для комбинированной выработки тепла и электрической энергии. Регулирование ГТУ. Регуляторы температуры газов и мощности. Регулирование энергетических блоков тепловых электрических станций и АЭС. Защитные устройства турбинных установок. Использование цифровых и микропроцессорных систем для управления турбинной установкой. Автоматизация пуска турбинной установки. Системы автоматического управления.

## **ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины:

6 семестр – кандидатский экзамен.

### **Вопросы для самоконтроля и проведения кандидатского экзамена**

1. В чем заключаются преимущества турбомашин перед другими двигателями?
2. В каких областях техники используются паровые и газовые турбины?
3. Какие основные показатели качества предъявляются к проектируемым энергетическим турбинам и турбоустановкам?
4. Какие типы турбин (по назначению) используются в энергетике?
5. Почему экономически целесообразны ТЭЦ с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии.
6. Что такое выработка электроэнергии на базе теплового потребления?
7. Что такое номинальная мощность турбоагрегата и в чем ее отличие для конденсационных и теплофикационных турбин?
8. В каком месте измеряются параметры свежего пара?
9. Как выбирается давление промперегрева в турбинах высоких параметров пара?
10. От чего зависит давление в конденсаторе?
11. Какие Вы знаете типы ПГУ? Какой из них и при каких условиях может обеспечить наивысший КПД всей установки?
12. Что такое степень бинарности цикла ПГУ?
13. Какие основные допущения принимаются при решении большого числа практических задач газодинамики применительно к турбинам и их элементам?

14. Какие основные фундаментальные уравнения используются для газодинамического расчета элементов турбин?

15. Что называется конфузорным безградиентным и диффузорным течением?

16. Каковы преимущества и недостатки турбинных решеток с расширяющимися каналами?

17. Что такое пограничный слой? В чем удобство расчета каналов турбинных решеток с использованием характеристик пограничного слоя?

18. Перечислите свойства собственных частот и форм колебаний.

19. Назовите основные геометрические и режимные характеристики турбинных решеток.

20. Что такое коэффициенты потерь, коэффициенты скорости и расхода? Как они определяются? От каких основных режимных и геометрических параметров они зависят?

21. Что такое переохлаждение пара? От чего оно зависит?

22. Как определяются потери от неравновесности для влажного пара? При каких условиях течения в турбинных решетках нужно их определять?

23. Почему обычно коэффициент расхода для турбинных решеток при течения влажного пара выше чем перегретого?

24. За счет чего создается окружное усилие, действующее на рабочие лопатки?

25. Что такое относительный лопаточный КПД ступени и какие потери энергии он учитывает?

26. Как и почему меняются по радиусу давления в зазоре между кольцевыми решетками осевой ступени и за ней?

27. Как влияет форма меридиональных линий тока на изменение по радиусу степени реактивности турбинной ступени?

28. Какие имеются способы уменьшения радиального градиента реактивности?

29. Какие потери в турбинной ступени учитываются относительным внутренним КПД?

30. Чем объясняются потери от парциального подвода в турбинной ступени?

31. Какие сравнительные достоинства и недостатки и в каких случаях имеют многоступенчатые турбины активного и реактивного типов?

32. Какие идеи заложены в конструкции ступеней-сепараторов?

33. Как выбирают осевые зазоры в лабиринтовых уплотнениях?

34. Клапаны каких видов (по назначению) применяют в паровых турбинах? какие к ним предъявляются требования?

35. В чем различие конструкции (и условиях течения) частей высокого и низкого давления конденсационных турбин?

36. Какие применяются способы уравнивания осевого усилия и уменьшения усилия, действующего на упорный подшипник многоцилиндровой турбины?

37. Какие достоинства имеет унификация группы ступеней. Чем они обусловлены?

38. Что такое система парораспределения? какие известны виды парораспределения?

39. Что такое регулирование нагрузки турбины скользящим давлением?

40. Что называется режимом холостого хода турбоагрегата? На преодоление каких потерь в турбоагрегате расходуется пропуск пара на холостом ходе?

41. В чем заключается универсальность зависимость мощности турбины от изменения давления в конденсаторе?

42. Что такое комбинированная система регулирования нагрузки?

43. В чем принципиальное различие расчетов переменного режима работы турбины при до- и закритическом режимах течения в рабочей решетке последней ступени?

44. Почему турбины с противодавлением нашли ограниченное применение? Почему турбины с противодавлением выполняются с сопловым парораспределением?

45. Что такое диаграмма режимов турбины с одним регулируемым отбором пара? Чем определяются рабочие границы этой диаграммы?

46. Что такое работы теплофикационных турбин по тепловому и электрическому графику?

47. В каких случаях применяются турбины с двумя регулируемыми отборами пара?

48. Что такое переключаемый отсек в турбинах типа Т?

49. Какие типы роторов применяются в турбинах? Какие достоинства и недостатки имеет каждый из этих типов?

50. Какие типы и конфигурации бандажей рабочих лопаток применяются в турбинах? Их преимущества и недостатки?

51. Укажите численные значения требуемых ГОСТ основных показателей надежности энергетических турбин.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература:

1. Паровые и газовые турбины для электростанций: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. Под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательство МЭИ, 2008. (ISBN: 5-903072-53-4).
2. Тепловые электрические станции. Учебник для вузов. / В.Д. Буров, Е.В., Дорохов, Д.П. Елизаров и др.; под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 466 с. (ISBN: 978-5-903072-86-6).
3. Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. М.: Издательство МЭИ, 2006. (ISBN: 5-903072-53-4).

4. Трухний А.Д., Булкин А.Е. Тихоходные паровые турбины атомных электрических станций: Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ. 2011. (ISBN: 5-903072-53-4).
5. Газотурбинные энергетические установки: учебное пособие для вузов по направлению "Теплоэнергетика" / С.В. Цанев, и др.; Ред. С.В. Цанев. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – 428 с. (ISBN: 978-5-383-00504-0).
6. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. Учебное пособие для вузов по направлениям "Энергетическое машиностроение", "Теплоэнергетика и теплотехника". – М.: Изд. дом МЭИ, 2013 . – 648 с. (ISBN: 978-5-383-00721-1).
7. Зарянкин А. Е. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей. Учебник для вузов по направлению "Энергетическое машиностроение" и "Теплоэнергетика и теплотехника". – М.: Изд. дом МЭИ, 2014 . – 590 с. (ISBN: 978-5-383-00903-1).
8. Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок. Учебное пособие для вузов по специальности "Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели" направления "Энергомашиностроение". – М.: Изд. дом МЭИ, 2009 . – 508 с. (ISBN 978-5-383-00208-7).

#### **Дополнительная литература:**

9. Щегляев А.В. Паровые турбины: Теория теплового процесса и конструкции турбин. Кн.1-2.: Учебник для энергомашиностроительных и теплоэнергетических специальностей вузов / А.В. Щегляев. – 6-е изд, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
10. Костюк А.Г, Шерстюк А.Н. Газотурбинные установки. Учебное пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных специальностей вузов. – М. : Высшая школа, 1979 . – 254 с.
11. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учебное пособие для вузов. – 3-е изд., стереот. – М: Изд.дом МЭИ, 2009 – 584 с. (ISBN: 978-5-383-00340-4)
12. Дейч М.Е. Газодинамика решеток турбомашин / М.Е. Дейч; Ред. Г. А. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1996 . – 528 с.
13. Самойлович Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / Г. С. Самойлович, Б. М. Трояновский. – М.: Энергоиздат, 1982 . – 496 с.
14. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. Учебное пособие для вузов по энергетическим специальностям / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с. (ISBN: 978-5-383-00563-7).