

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе  
д.т.н. проф. Драгунов В.К.

« 27 мая » 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**специальной дисциплины 2.4.7. Турбомашины и поршневые**  
**двигатели**

Москва 2022

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности 2.4.7 «Турбомашин и поршневые двигатели» в действующей редакции и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** освоения дисциплины является изучение современных методов проектирования и эксплуатации турбомашин и комбинированных турбоустановок.

**Задачами** дисциплины являются:

- формирование практических навыков теоретических и прикладных исследований по расчету и проектированию турбомашин и 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.

## **МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

### **Формула специальности**

Научная специальность, объединяющая теоретические и прикладные исследования по расчету и проектированию (в том числе с применением современных информационных технологий), технологии производства, монтажу, эксплуатации и ремонту турбомашин и турбоустановок, агрегатов и аппаратов вспомогательного оборудования, используемых на электростанциях и на транспорте. В рамках научной специальности исследуются закономерности механических, теплофизических, гидродинамических, информационных, экономических и других связей с целью совершенствования существующих и создания новых энергетических, а также транспортных

турбомашин и комбинированных турбоустановок, обладающих высокими показателями экономичности, надежности, технологичности, безопасности в эксплуатации и низкой себестоимостью.

#### **Области исследований:**

1. Разработка 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.

2. Физические исследования и математическое моделирование рабочего ресурса турбомашин и комбинированных турбоустановок.

3. Экспериментальные исследования в области деформирования, прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов, циклов, схем, режимов работы основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок.

4. Математическое моделирование и исследование динамики и прочности элементов и деталей турбомашин и комбинированных турбоустановок.

5. Разработка систем автоматического регулирования, управления, защиты турбомашин и комбинированных турбоустановок.

6. Мониторинг и диагностика технического состояния основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок.

**Отрасль науки:** технические науки

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Тепловые циклы турбинных установок**

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.

### **Механика жидкости и газа**

*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 сопл и непрофилированных отверстий.** Переменные режимы суживающихся сопл. Сопло Лавалья и диаграмма переменных режимов сопл Лавля. Профилированные сопла Лавалья. 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 пограничного 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.

### **Ступень турбомашин**

Преобразование энергии в ступенях турбины и компрессора. Расчет турбинной и компрессорной ступеней. Особенности проектирования ступеней большой веерности. 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.

### **Решетки турбомашин**

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 в решетках турбомашин. Переменные, аэродинамические силы. Вынужденные и самовозбуждающиеся колебания рабочих лопаток турбины и компрессора. Флаттер и помпаж. Вращающийся отрыв в решетках турбомашин. Пульсации давления в потоках влажного пара, нестационарные скачки конденсации.

### **Многоступенчатые турбины**

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. Техничко-экономические основы выбора конструкции турбины. Осевые усилия в турбинах, их расчет и методы уравнивания. Концевые уплотнения. Регулирующие лапаны, 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).

### **Расчет и проектирование многоступенчатых компрессоров)**

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.

### **Переменный режим работы турбин**

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.

### **Турбины для комбинированной выработки тепла и электрической энергии**

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

### **Теплообмен в элементах турбомашин**

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.

### **Динамика и прочность деталей паровых и газовых турбин**

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.

### **Регулирование турбин**

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**

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 течении 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.

### **Вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:**

1. Сравнение и выбор систем парораспределения. Скользящее давление.
2. Вибрационная надежность длинных рабочих лопаток.
3. Переходные процессы в системах регулирования паровых турбин.
4. Переменный режим работы последней ступени конденсационной паровой турбины.
5. Маневренность турбин и пути ее повышения.
6. Особенности регулирования влажнопаровых турбин АЭС.
7. Схемы газотурбинных установок и их экономичность. Преимущества и недостатки разных схем ГТУ.
8. Расчет собственных частот турбинных лопаток.
9. Особенности регулирования турбин с регулируемым отбором пара.
10. Особенности конструкций, параметров, расчета паровых турбин для АЭС.
11. Изгиб рабочих лопаток. Допускаемые напряжения.
12. Статическая характеристика системы регулирования конденсационной паровой турбины. Требования к степени неравномерности и степени нечувствительности.
13. Изменение осевых усилий в зависимости от режима работы турбины при установившихся и переходных режимах.
14. Динамические напряжения в лопатках с полным приводом пара.
15. Задачи регулирования паровых турбин. Моментные характеристики турбины и генератора.
16. Изменение экономичности турбины и надежности ее элементов в зависимости от расхода пара.
17. Причины вибраций валопроводов.
18. Регуляторы (первичные датчики) систем регулирования паровых турбин.
19. Ползучесть деталей турбин.
20. Влияние воздействия по производной на качество переходных процессов в системе регулирования паровых турбин.

### **ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.



## Требования и критерии оценивания ответов экзамена

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом не принципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

- а) не ответил на вопросы экзаменационного билета
- б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 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. 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).
3. 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).
4. 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:

5. 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.
6. Дейч М.Е. Газодинамика решеток турбомашин / М.Е. Дейч; Ред. Г. А. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1996 . – 528 с.
7. Самойлович Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / Г. С. Самойлович, Б. М. Трояновский. – М.: Энергоиздат, 1982. – 496 с.
8. 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).

#### ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Доцент кафедры Паровых и  
газовых турбин  
к.т.н.

Зав. кафедрой Паровых и  
газовых турбин  
д.т.н., профессор

И.о. директора ЭнМИ  
д.т.н., доцент



О.М. Митрохова

В.Г. Грибин

И.В. Меркурьев