

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующий баз. каф.
«Атомные станции с водо-водяными
энергетическими реакторами» (АСВВЭР)



Иванченко А. И.
22.04.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.07 Турбомашины АЭС

1. Код и наименование специальности:

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

2. Специализация:

Проектирование и эксплуатация атомных станций

3. Квалификация выпускника: инженер – физик

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

Баз. каф. «Атомные станции с водо-водяными энергетическими реакторами» (АСВВЭР)

6. Составители программы:

и.о. зав. базовой каф. «Атомные станции с водо-водяными энергетическими реакторами»
(АСВВЭР), к.т.н., доц. Иванченко А.И.

7. Рекомендована:

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №4 от 18.04.2025 г.

8. Учебный год: 2027/2028, 2028/2029

Семестр(ы): 6,7

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- изучению турбинного оборудования, используемого на атомных электрических станциях.

Задачи учебной дисциплины:

- рассмотреть основные показатели турбоустановок, принципы преобразования энергии в турбинной ступени, конструкции элементов многоступенчатой турбины и вспомогательного оборудования турбоустановки.

- изучить общие принципы регулирования, защиты и маслоснабжения турбин.

- приобрести навыки по расчету параметров цикла паротурбинной и газотурбинной установки, определению кинематических и геометрических характеристик ступеней, распределению теплового перепада турбины по ступеням и определению числа ступеней.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Учебная дисциплина Турбомашин АЭС относится к вариативной части блока Б1.

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-1	Способен проводить производственно - технологические исследования систем и оборудования атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, участвовать во внедрении результатов исследований	ПК-1.4	Способен составлять аналитические обзоры по научно-технической тематике	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none">- параметры и характеристики турбинного оборудования АЭС;- особенности конструкции и способы регулирования работы турбины;- требования, предъявляемые к турбомашинам АЭС, конструктивные особенности и материалы трубопроводов;- требования, предъявляемые к арматуре турбомашин АЭС, классификацию и основные правила эксплуатации арматуры.
ПК-2	Способен анализировать и использовать научно-техническую информацию, формулировать цели проекта, ставить и решать инновационные задачи комплексного инженерного анализа в области проектирования	ПК-2.4	Использует вычислительную технику и численные методы для решения задач прикладной физики	<p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none">- определять основные характеристики турбомашин АЭС;- использовать методы физического моделирования и подобия при расчете турбинных агрегатов;- проводить расчет на прочность элементов турбин <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none">- основами эксплуатации паротурбинных установок АЭС.- основами проектирования паротурбинных установок АЭС.

	и эксплуатации АС			
ПК-4	Способен проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок систем и оборудования АС и ядерных энергетических установок, готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений, выполнять инженерные проекты с применением методов проектирования для достижения оптимальных результатов с учетом принципов и средств обеспечения ядерной и радиационной безопасности	ПК-4.2	Производит подготовку исходных данных для выбора и обоснования научно - технических решений	
ПК-10	Способен составлять и использовать тепловые схемы и математические модели процессов и аппаратов ядерно-энергетических и тепломеханических установок различных типов АС, готовить исходные данные для расчета тепловых схем	ПК-10.1	Обладает знаниями принципов составления схем установок, систем и математических моделей процессов	
		ПК-10.2	Составляет тепловые схемы и математические модели процессов и аппаратов преобразования ядерной энергии топлива в тепловую и электрическую энергию	
		ПК-10.3	Готовит исходные данные для расчета тепловых схем различных типов	
		ПК-10.4	Использует	

			математические модели и программные комплексы для численного анализа процессов в ядерно-энергетическом и тепломеханическом оборудовании АС	
--	--	--	--	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 7/252.

Форма промежуточной аттестации – зачет (6 семестр), экзамен (7 семестр)

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость		
	Всего	По семестрам	
		6 семестр	7 семестр
Аудиторные занятия	112	80	32
в том числе:	лекции	48	16
	практические	48	16
	лабораторные	16	
Самостоятельная работа	104	64	40
в том числе: курсовая работа (проект)		40	
Форма промежуточной аттестации	36	Зачет	Экзамен (36 ч)
Итого:	252	144	108

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
1. Лекции			
1.1	Введение	Тепловые циклы и принципиальные схемы турбоустановок. Место и назначение паровых и газовых турбин в схемах атомных электростанций. Энергетическая программа о развитии атомной энергетики. Современное состояние турбиностроения в России и за рубежом. Вопросы охраны окружающей среды АЭС.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.2	Тепловые схемы турбоустановок АЭС и их экономичность	Особенности схем турбин для АЭС. Коэффициенты полезного действия турбины и всей турбоустановки. Пути повышения экономичности турбоустановок. Влияние эффективности работы турбомашин на экономичность АЭС; влияние начальных и конечных параметров пара; влияние влажности. Промежуточная сепарация и перегрев пара. Выбор разделительного давления в турбинах АЭС. Регенерация тепла. Перспективы применения на АЭС ГТУ. Типы турбин и их классификация. Стандартизация основных параметров турбин. Обозначение турбин.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.3	Преобразование энергии рабочего тела в турбинной ступени	Степень турбины. Тепловой процесс в турбинной ступени. Активный и реактивный способы расширения в ступени. Степень реакции. Треугольники скоростей и давления. Усилия, действующие на лопатки. Классификация решеток; основные обозначения. Потери энергии в турбинной ступени. Конструктивные характеристики	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242

		сопловых и рабочих решеток. Коэффициент полезного действия ступени и его зависимость от соотношения скоростей. Расход через ступень и ее размеры. Полный и парциальный подвод рабочего тела к ступени. Дополнительные потери в ступенях турбин (потери на трение, вентиляцию и выколачивание). Рабочий процесс в ступени влажнопаровой турбины. Процесс расширения влажного пара. Движение влаги в турбине. Потери энергии от влажности. КПД влажнопаровой ступени. Эрозия; активные и пассивные методы борьбы с ней. Сепарация влаги в турбине: внутреннее влагоудаление, влагоулавливание за направляющими лопатками и за рабочим колесом. Расчет турбинной ступени, работающей в перегретом паре. Особенности течения пара в ступенях с длинными лопатками; методы расчета этих ступеней. Особенности расчета турбинной ступени, работающей во влажном паре.	
1.4	Многоступенчатые турбины (МСТ)	Конструктивная схема МСТ и ее связь с процессом преобразования энергии. Преимущества МСТ. Основы выбора конструкции. Деление МСТ на цилиндры и отсеки. Регулирующая ступень. Ступени с короткими лопатками. Особенности ступеней с длинными лопатками. Процесс расширения пара в турбине. Коэффициент возврата тепла и его влияние на КПД. Характеристический коэффициент и его связь с числом ступеней. Влияние влажности на эффективность работы МСТ. Выбор числа оборотов турбины. Выбор разделительного давления и разбивка теплоперепада по цилиндрам. Расчет первой и последней ступени цилиндров. Осевые усилия в МСТ и способы их уравнивания. Потери от утечек пара в турбинах. Устройство и принцип действия концевых уплотнений МСТ. Расчет ступенчатого лабиринтового уплотнения. Особенности расчета и проектирования уплотнений турбин, работающих на радиоактивных средах.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.5	Работа турбины при переменном режиме	Переменный режим работы турбинной установки. Причины, обуславливающие переменный режим работы, классификация режимов. Работа сопел при переменном режиме. Расширение потока в косом срезе решеток. Переменный режим работы ступени. Влияние соотношения скоростей на КПД и реакцию ступени при переменном режиме. Изменение давлений и теплоперепадов по ступеням МСТ при переменном режиме работы. Тепловой процесс в паровой турбине при переменном расходе пара. Типы парораспределения МСТ. Выбор типа парораспределения для турбин АЭС. Влияние изменений параметров свежего пара и давления в конденсаторе на мощность и экономичность турбин. Диаграммы, характеризующие переменный режим работы турбины.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.6	Конструкция основных элементов турбин	Конструкция и материал рабочих лопаток. Растяжение, изгиб и вибрация рабочих лопаток. Обеспечение надежности облопачивания при колебаниях лопаток. Диски. Цельнокованные и комбинированные роторы. Посадка диска на вал, напряжение в диске. Критическое число оборотов ротора. Соединительные муфты; их типы,	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242

		конструкции, материалы. Статоры турбин. Корпус цилиндра. Крепление корпуса и обеспечение тепловых расширений. Центровка. Фланцевое соединение. Диафрагмы. Прочность и прогиб диафрагм. Обоймы. Крепление в корпусах диафрагм и обойм. Подшипники. Принцип работы подшипников. Опорные, упорные и опорно-упорные подшипники. Общие принципы конструирования турбин АЭС. Типовые конструкции влажнопаровых турбин. Паровые турбины для АЭС высоких начальных параметров. Методы расчета на прочность элементов турбин АЭС. Условия работы элементов турбин. Металлы, применяемые в турбинах АЭС.	
1.7	Система регулирования, защиты и маслоснабжения турбин	Общие принципы регулирования турбин. Схемы прямого и непрямого регулирования. Примеры принципиальных схем регулирования. Особенности регулирования турбин АЭС. Статическая характеристика регулирования. Нечувствительность регулирования. Параллельная работа турбоагрегатов. Регулирование и защита турбин АЭС. Конструкции органов парораспределения, регулирования и защиты турбины. Схема маслоснабжения турбин АЭС. Основные элементы системы подачи и распределения масла: насосы, маслопроводы, баки, инжекторы, маслоохладители. Аварийная смазка подшипников. Вопросы пожарной безопасности. Физико-химические и эксплуатационные свойства турбинных масел. Обеспечение надежности систем регулирования, защиты и маслоснабжения турбин в условиях эксплуатации.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.8	Конденсационная установка (КУ)	Назначение, состав и схемы конденсационной установки (КУ). Конструктивная схема конденсатора. Взаимодействие основных потоков в конденсаторе. Водяная и паровая стороны конденсатора. Принципы рациональной компоновки трубного пучка конденсатора. Паровое сопротивление, присосы воздуха и его удаление. Обзор современных конструкций конденсаторов паровых турбин АЭС. Методики теплового и гидродинамического расчета конденсаторов. Насосы КУ. Принцип действия, конструкция воздушных насосов (эжекторов). Особенности работы и выбора конденсатных и циркуляционных насосов. Основы эксплуатации КУ. Обеспечение воздушной и гидравлической плотности конденсатора. Загрязнение труб конденсатора. Способы контроля состояния поверхности теплообмена и обеспечение оптимальных сроков чистки конденсаторов. Методы предупреждения загрязнений и чистки конденсаторов. Повышение эффективности работы КУ за счет интенсификации теплообмена в конденсаторах паровых турбин.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.9	Вспомогательное оборудование турбинной установки	Регенеративные подогреватели: смешивающие и поверхностного типа. Принцип действия и конструкция. Деаэраторы питательной воды, принцип действия и устройство. Питательные насосы и их привод. Сепараторы и промперегреватели. Конструкция и принцип действия.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
1.10	Основы эксплуатации паротурбинных установок	Пусковая схема турбоустановки. Подготовка к пуску и пуск турбоустановки из холодного состояния.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242

		Особенности пуска турбины из неостывшего состояния. Обслуживание турбоустановки при установившемся режиме работы. Разгрузка турбоагрегата. Выбег ротора. Аварии и неполадки турбин АЭС.	hp?id=29242
1.11	Газотурбинные установки (ГТУ) на АЭС	Классификация ГТУ и стандартизация основных параметров. Циклы ГТУ при $P = \text{const}$. Выбор рабочего тела для ГТУ на диссоциирующих газах. Обзор конструкций современных ГТУ. Преимущества и недостатки современных газовых турбин в сравнении с другими тепловыми двигателями. Особенности конструкции газовых турбин. Перспективы применения ГТУ на АЭС.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2. Практические занятия			
2.1	Тепловые схемы турбоустановок АЭС и их экономичность	Расчет параметров цикла ПТУ	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.2	Преобразование энергии рабочего тела в турбинной ступени	Определение кинематических и геометрических характеристик ступеней. Построение треугольников скоростей	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.3	Многоступенчатые турбины (МСТ)	Распределение теплового перепада турбины по ступеням, определение числа ступеней	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.4	Работа турбины при переменном режиме	Сетка расходов А.В. Щегляева	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.5	Конструкция основных элементов турбин	Конструкция деталей роторной группы, конструкция деталей статорной группы турбин	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.6	Система регулирования, защиты и маслоснабжения турбин	Схемы регулирования турбин АЭС	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.7	Конденсационная установка (КУ)	Характеристики конденсационной установки	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
2.8	Газотурбинные установки (ГТУ) на АЭС	Расчет цикла ГТУ	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
3. Лабораторные занятия			
3.1	Тепловые схемы турбоустановок АЭС и их экономичность	Лабораторная работа №1.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
3.2	Преобразование энергии рабочего тела в турбинной ступени	Лабораторная работа №2.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242
3.3	Система регулирования, защиты и маслоснабжения турбин	Лабораторная работа №3.	https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=29242

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1.	Введение	2			4	6
2.	Тепловые схемы турбоустановок АЭС и их экономичность	4	4	6	8	22

3.	Преобразование энергии рабочего тела в турбинной ступени	4	6	4	10	24
4.	Многоступенчатые турбины (МСТ)	4	8		12	24
5.	Работа турбины при переменном режиме	6	8		14	28
6.	Конструкция основных элементов турбин	6	8		14	28
7.	Система регулирования, защиты и маслоснабжения турбин	6	6	6	14	32
8.	Конденсационная установка (КУ)	4	4		8	16
9.	Вспомогательное оборудование турбинной установки	4			6	10
10.	Основы эксплуатации Паротурбинных установок	4			6	10
11.	Газотурбинные установки (ГТУ) на АЭС	4	4		8	16
	Контроль					36
	Итого:	48	48	16	104	252

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Студентам на лекциях необходимо вести подробный конспект и стараться понять материал курса. Для полного понимания материала следует активно использовать консультации. Для самостоятельного изучения разделов курса, рекомендованных преподавателем, необходимо пользоваться основной и дополнительной литературой, интернет-ресурсами.

На практических занятиях необходимо уметь решать задачи и анализировать решение, на устных опросах обучаемый должен уметь демонстрировать полученные на лекциях и практических занятиях знания, умения и навыки, отвечать на поставленные вопросы, поддерживать дискуссию по существу вопроса.

Методическое обеспечение аудиторной работы: учебно-методические пособия для студентов, учебники и учебные пособия, электронные и Интернет-ресурсы.

Методическое обеспечение самостоятельной работы: учебно-методические пособия по организации самостоятельной работы, контрольные задания и тесты в бумажном и электронном вариантах, тестирующие системы, дистанционные формы общения с преподавателем. Контроль самостоятельной работы реализуется с помощью опросов, тестов, вопросов по темам заданий и т.д.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1.	Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. Паровые и газовые турбины атомных электростанций. - М.: Энергоатомиздат 1985.- 256 с., ил.
2.	Паротурбинные установки атомных электростанций/под. ред. Ю.Ф. Косяка. М.: Энергия, 1978. 312 с.
3.	Тепловые и атомные электрические станции: справочник; под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4.	Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции: учебник для вузов/Т.Х.Маргулова. М.: Высшая школа, 1984. 304 с.
5.	Трояновский Б.М. Турбины для атомных электростанций/Б.М. Трояновский. М.: Энергия, 1973. 184 с.
6.	Косяк Ю.Ф. Эксплуатация турбин АЭС/Ю.Ф. Косяк, В.Н. Галанцан, В.А. Палей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
7.	Тепловые и атомные электрические станции: справочник; под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.
8.	Дмитриев С. М., Зверев Д. Л., Бых О. А., Панов Ю. К., Сорокин Н. М., Фарафонов В. А. Основное оборудование АЭС: учебное пособие, Издательство:Высшая школа, 2015

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет) *:

№ п/п	Ресурс
9.	www.lib.vsu.ru – ЗНБ ВГУ.
10.	https://edu.vsu.ru – Электронный университет ВГУ
11.	https://e.lanbook.com – ЭБС «Лань»
12.	https://www.studentlibrary.ru – ЭБС «Консультант студента»
13.	https://urait.ru – Образовательная платформа «ЮРАЙТ»
14.	https://rucont.ru - Информационно-телекоммуникационная система «Контекстум»

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
15.	Тепловой расчет проточной части паровых турбин [Текст]: учебное пособие / А. В. Осипов, А. В. Бирюков; М-во образования и науки Российской Федерации, Брянский гос. технический ун-т Брянск: Изд-во БГТУ, 2012 - 118 с.
16.	Бродов Ю.М. Тепловой расчет ЦВД влажнопаровой турбины: Методические указания к курсовой работе. Свердловск: УПИ, 1990. 37 с.
17.	Тепловые и атомные электрические станции: Справочник/ Под общ. ред. В.А.Григорьева, В.А.Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 609 с.

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При проведении занятий по дисциплине используются следующие образовательные технологии:

1. активные и интерактивные формы проведения занятий;
2. компьютерные технологии при проведении занятий;
3. презентационные материалы и технологии при объяснении материала на лекционных и практических занятиях;
4. специализированное оборудование при проведении лабораторных работ;
5. разбор конкретных ситуаций при постановке целей и задач к разработке прикладных программ, при выборе программного обеспечения по установленным критериям, при разработке программ по предусмотренным алгоритмам и метода.

Для самостоятельной работы используется ЭБС Университетская библиотека online - www.lib.vsu.ru - ЗНБ ВГУ. Программное обеспечение, применяемое при реализации дисциплины – Microsoft Windows, LibreOffice, CodeBlocks, Adobe Reader, Mozilla FireFox.

Дистанционные образовательные технологии (ДОТ) применяются с использованием образовательного портала «Электронный университет ВГУ».

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лаборатория им. Л.Н. Сухотина (для проведения занятий лекционного и семинарского типов, текущего контроля и промежуточной аттестации)

Специализированная мебель, ноутбук, проектор

Microsoft Windows 7, Windows 10

LibreOffice, Adobe Reader

Лаборатория (для проведения занятий лекционного и семинарского типов, текущего контроля и промежуточной аттестации. Специализированная мебель.

Компьютерный класс, аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, помещение для самостоятельной работы

Специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета

Microsoft Windows 10, LibreOffice, Adobe Reader

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Введение	ПК-1 ПК-2 ПК-4 ПК-10	ПК-1.4 ПК-2.4 ПК-4.2 ПК-10.1 ПК-10.2 ПК-10.3 ПК-10.4	Курсовой проект, отчеты по лабораторным работам, практические занятия, тестовые задания (п. 21 ФОС)
2.	Тепловые схемы турбоустановок АЭС и их экономичность			
3.	Преобразование энергии рабочего тела в турбинной ступени			
4.	Многоступенчатые турбины (МСТ)			
5.	Работа турбины при переменном режиме			
6.	Конструкция основных элементов турбин			
7.	Система регулирования, защиты и маслоснабжения турбин			
8.	Конденсационная установка (КУ)			
9.	Вспомогательное оборудование турбинной установки			
10.	Основы эксплуатации Паротурбинных установок			
11.	Газотурбинные установки (ГТУ) на АЭС			
Промежуточная аттестация форма контроля – экзамен				Перечень вопросов к экзамену Пункт 20.2

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень тем для курсового проекта:

Варианты заданий составляются на базе серийных конденсационных турбин, работающих на влажном паре: К-220-44, К-500-65/3000, К-500-60/1500, К-1000-60/1500, К-750-65/3000, К-1000-60/3000, а также работающих на перегретом паре на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах: К-800-130/3000, К-200-130/3000.

1. Определение предельной мощности и числа потоков пара в части низкого давления турбины.
2. Предварительный расчёт последней ступени цилиндра.
3. Подробный тепловой расчет 1-ой ступени цилиндра.
4. Определение числа ступеней цилиндра, заданного для подробного проектирования.
5. Подробный тепловой расчет 1-ой ступени цилиндра.
6. Подробный тепловой расчёт 2-ой ступени и последней ступеней цилиндра; приближенный расчёт промежуточных ступеней.
7. Определение мощности одного потока цилиндра, всего цилиндра и всей турбины.
8. Сводка показателей тепловой экономичности турбины (удельные расходы тепла и пара, все коэффициенты полезного действия).
9. Расчёт элементов турбины на прочность (на растяжение и изгиб рассчитывается лопатка, рассчитывается ее хвостовик, рассчитывается шейка вала на скручивание; расчёт критического числа оборотов ротора цилиндра приближенным путём). Определение осевого усилия на ротор в пределах одной ступени.

Во время выполнения курсового проекта студенты детально прорабатывают методики ведения теплового расчёта турбины и расчётов на прочность отдельных деталей турбины; в процессе выполнения проекта изучается конструкция паровой турбины: корпуса, ротора, муфт, рабочих лопаток и способы закрепления их на дисках, обеспечение термических расширений турбины, обойм, диафрагм, конструкции уплотнений диафрагм и концевых уплотнений, опорные и упорные, опорно- упорные подшипники, валоповорот, получают представление об обеспечении смазки подшипников, конструкции парораспределительных клапанов, общее представление о системе регулирования, о видах защит и т.п.. Курсовой проект предусматривает цель глубокого изучения лекций и литературы по дисциплине.

Оценка «отлично» выставляется при выполнении курсового проекта (работы) в полном объеме; используется основная литература по проблеме, работа отличается глубиной проработки всех разделов содержательной части, оформлена с соблюдением установленных правил; студент свободно владеет теоретическим материалом, безошибочно применяет его при решении задач, сформулированных в задании; на все вопросы дает правильные и обоснованные ответы, убедительно защищает свою точку зрения.

Оценка «хорошо» выставляется при выполнении курсовой работы в полном объеме; работа отличается глубиной проработки всех разделов содержательной части, оформлена с соблюдением установленных правил; студент твердо владеет теоретическим материалом, может применять его самостоятельно или по указанию преподавателя; на большинство вопросов даны правильные ответы, защищает свою точку зрения достаточно обосновано.

Оценка «удовлетворительно» выставляется при выполнении курсовой работы в основном правильно, но без достаточно глубокой проработки некоторых разделов; студент усвоил только основные разделы теоретического материала и по указанию преподавателя (без инициативы и самостоятельности) применяет его практически; на вопросы отвечает неуверенно или допускает ошибки, неуверенно защищает свою точку зрения.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, когда студент не может защитить свои решения, допускает грубые фактические ошибки при ответах на поставленные вопросы или вовсе не отвечает на них.

Перечень тем лабораторных работ:

Лабораторная работа №1. Изучение конструкций паровых турбин (лопатки, диафрагмы, обоймы, уплотнения).

Лабораторная работа №2. Исследование характеристик турбинной ступени.

Лабораторная работа №3. Исследование сопловой системы парораспределения паровой турбины.

Перечень тем практических заданий:

1. Расчет теоретического процесса расширения в суживающихся соплах.
2. Расчет теоретического процесса расширения в расширяющихся соплах.
3. Расчет действительного процесса расширения в суживающихся соплах.
4. Расчет действительного процесса расширения в расширяющихся соплах.
5. Геометрические характеристики турбинных решеток с цилиндрическим бандажом.
6. Геометрические характеристики турбинных решеток с коническим бандажом.
7. Тепловой расчет турбинной ступени.
8. Расчет оптимального безразмерного отношения скоростей турбинной ступени.
9. Определение геометрических размеров ступени.
10. Профилирование лопаток турбинных ступеней.
11. Изучение конструкций паровых турбин: роторы.
12. Изучение конструкций паровых турбин: диски.
13. Предельная мощность однопоточной турбины.
14. Определение структурной схемы турбины.
15. Определение диаметра первой ступени цилиндра паровой турбины
16. Определение диаметра последней ступени цилиндра паровой турбины
17. Определение числа ступеней цилиндра паровой турбины.
18. Расчет переменного режима турбинной ступени.
19. Расчет переменного режима группы ступеней.
20. Расчет переменного режима работы турбины с дроссельной системой парораспределения.
21. Расчет переменного режима работы турбины с сопловой системой парораспределения.
22. Изучение конструкций паровых турбин: муфты.
23. Особенности расчета проточной части противодавленческих турбин.
24. Особенности расчета проточной части турбин с регулируемыми отборами пара.
25. Расчет водяного конденсатора паровой турбины. Часть 1.

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень вопросов к экзамену:

1. Тепловые циклы и принципиальные схемы турбоустановок.
2. Особенности схем турбинных установок АЭС.
3. Влияние на экономичность турбоустановок начальных и конечных параметров пара, влажности пара.
4. Промежуточный перегрев и сепарация
5. Ступень паровой турбины и ее элементы. Расширение пара в сопловой решетке. Определение скорости потока.
6. Активная ступень. Построение процесса в тепловой диаграмме. Треугольники скоростей.
7. Реактивная ступень, степень реактивности. Определение скорости на выходе из рабочих лопаток. Построение процесса расширения в тепловой диаграмме. Треугольники скоростей.
8. Классификация профилей сопловых и рабочих лопаток.
9. Определение высот сопловых и рабочих лопаток.
10. Основные потери энергии в ступени. Относительны лопаточный КПД ступени и его зависимость от характеристики ступени $U/Cф$.
11. Дополнительные потери в ступени. Относительный внутренний КПД.
12. Рабочий процесс в ступени влажнопаровой турбины. Потери энергии от влажности пара. КПД влажнопаровой ступени.

13. Эрозия и методы борьбы с ней: сепарация пара, внутреннее влагоудаление, защита проточной части.
 14. Ступени с длинными рабочими лопатками. Построение треугольников скоростей для различных сечений: корневого, среднего и периферийного. Законы закруток лопаток.
 15. Схема многоступенчатой турбины, основных элементы и их назначение. Изменение параметров вдоль оси турбины. Преимущества и недостатки многоступенчатых турбин.
 16. Методика расчета многоступенчатых паровых турбин. Определение числа ступеней и их диаметров. Разбивка теплоперепада по ступеням.
 17. Коэффициент возврата тепла и его оценка. Физический смысл коэффициента возврата тепла.
 18. Осевое усилие многоступенчатых паровых турбин. Способы уменьшения усилия.
 19. Построение предполагаемого теплового процесса в диаграмме $h-s$ для влажнопаровой турбины.
 20. Подогреватели системы регенерации турбинных установок. Определение расходов пара на подогреватели, уравнения тепловых балансов.
 21. Системы парораспределения паровых турбин. Дроссельное и сопловое парораспределение. Преимущества и недостатки.
 22. Концевые уплотнения паровых турбин и их назначение. Схема лабиринтовых уплотнений. Расчет лабиринтовых уплотнений.
 23. Конденсационные установки паровых турбин. Назначение, схема и основные элементы конденсационной установки.
 24. Тепловой расчет конденсатора. Задачи теплового расчета. Компоновки трубных пучков конденсаторов.
 25. Основные характеристики конденсатора, полученные опытным путем.
 26. Воздухоотсасывающие устройства конденсационных установок. Эжекторы, принцип действия и назначение. Типы эжекторов.
 27. Основы эксплуатации конденсационной установки. Гидравлическая и воздушная плотность конденсатора. Чистка поверхности охлаждения конденсатора.
 28. Насосы конденсационной установки: конденсатные и циркуляционные насосы. Особенности конструкции, условия работы.
 29. Работа ступени турбомашин при переменном режиме. Изменение КПД ступени.
 30. Последняя ступень паровой конденсационной турбины при переменном давлении в конденсаторе. Понятие об экономическом и предельном вакууме.
 31. Причины, вызывающие переменный режим работы турбины.
 32. Изменение реактивности при переменном режиме.
 33. Диаграмма $G-P$ при разных системах парораспределения.
 34. Выбор допустимых напряжений для основных деталей турбины.
 35. Конструкция роторов турбин: цельнокованные, сварные и с насадными дисками.
- Области применения.
36. Колебания валов, типы колебаний. Критическая частота вращения ротора. Жесткие и гибкие валы.
 37. Подшипники турбин. Опорные и упорные подшипники. Назначение и конструкция.
 38. Особенности конструкций деталей влажнопаровых турбин. Способы защиты проточной части от эрозии.
 39. Корпуса паровых турбин. Требования к конструкции корпуса. Определение толщины стенки корпуса.
 40. Диафрагмы паровых турбин. Конструкция и назначение. Способы установки диафрагм в корпусе турбины. Определение толщины диафрагм.
 41. Рабочие лопатки паровых турбин. Конструкция. Виды хвостовиков. Растяжение рабочих лопаток центробежными силами. Изгиб лопаток от паровых усилий.
 42. Колебания рабочих лопаток, причины, вызывающие колебания, виды колебаний. Резонансная диаграмма лопаток.
 43. Схемы простейшей ГТУ. Основные элементы и их назначение. Изображение цикла ГТУ в $T-S$ диаграмме.
 44. Способы повышения КПД газотурбинных установок.
 45. ГТУ закрытого типа. Гелиевые и углекислотные установки. Принцип действия и схема.
 46. Режимы работы турбин АЭС и принципы построения АСР.

47. Статическая характеристика АСР турбины и основные показатели.
48. Параллельная работа турбин и механизм управления турбиной.
49. Регулирующие органы турбин АЭС.
50. Защитные устройства турбин.
51. Электрогидравлические системы регулирования.
52. Требования, предъявляемые к работе турбоустановок.
53. Пуск и остановка турбоагрегата

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

Контрольно-измерительные материалы промежуточной аттестации включают в себя теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень полученных знаний и/или практическое(ие) задание(я), позволяющее(ие) оценить степень сформированности умений и(или) навыков, и(или) опыт деятельности.

При оценивании используются количественные или качественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены ниже.

Критерии оценивания компетенций	Шкала оценок
Обучающийся демонстрирует полное и глубокое усвоение материала, грамотное и логичное изложение мыслей, обоснованность выводов, умение сочетать теорию с практикой, наличие аналитического мышления.	Отлично
Обучающийся демонстрирует твердое знание материалов учебного курса, его грамотное изложение, отсутствие существенных неточностей в ответе.	Хорошо
Обучающийся демонстрирует наличие пробелов в усвоении основного материала, неточности формулировок, недостаточная аргументация выводов, отсутствие последовательности в ответе.	Удовлетворительно
Обучающийся демонстрирует отсутствие знаний основного материала, существенные ошибки при ответах на дополнительные вопросы, неумение логически обосновать ответ	Неудовлетворительно

Пример контрольно-измерительного материала (КИМ)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующий баз. каф.
«Атомные станции с водо-водяными
энергетическими реакторами» (АСВВЭР
_____ Иванченко А. И.

Направление подготовки:

14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг.

Дисциплина: Б1.В.07 Турбомашин АЭС

Вид контроля: Экзамен.

Контрольно-измерительный материал №1

1. Реактивная ступень, степень реактивности. Определение скорости на выходе из рабочих лопаток. Построение процесса расширения в тепловой диаграмме. Треугольники скоростей.
2. Насосы конденсационной установки: конденсатные и циркуляционные насосы. Особенности конструкции, условия работы.

Преподаватель _____
подпись _____ расшифровка подписи _____

21. Фонд оценочных средств

Тестовые задания с открытым ответом

1) Турбиной называют...

А) называют вращающееся устройство, которое приводится в действие потоком жидкости или газа.

Б) специальный агрегат, использующий энергию отработавших газов для раскручивания крыльчатки и нагнетания атмосферного воздуха.

2) Реактивные турбины – это

А) Ступени, в которых процесс расширения пара и связанного с ним ускорения потока происходит не только в каналах сопловых, но и в каналах рабочих лопаток.

Б) Ступени, в которых процесс расширения жидкости и связанного с ним ускорения потока происходит не только в каналах сопловых, но и в каналах рабочих лопаток.

3) Тепловая схема АЭС состоит из

А) Перепроизводящая установка-> тепловой двигатель (турбина) -> генератор

Б) Топливо-> тепловой двигатель (турбина) -> генератор

В) Реактор-> перепроизводящая установка -> генератор

4) КПД турбинных установок делятся на (выберите несколько вариантов):

А) Идеальная турбина.

Б) Внутренний.

В) Эффективный.

Г) Электрический.

Д) Все вышеперечисленные.

5) Для чего необходимо знание КПД?

А) необходимо для решения задачи, связывающей электрическую мощность с затрачиваемой тепловой мощностью ПТУ.

Б) необходимо для решения задачи, связывающей тепловую мощность с затрачиваемой тепловой мощностью ПТУ.

6) Расходными характеристиками реального потока в соплах является (выберите несколько вариантов):

А) площадь выходного сечения сопла (F_1).

Б) начальные параметры (p_0, t_0, c_0).

В) конечное давление (p_1).

Г) мощность (P).

Д) Все вышеперечисленные.

7) Перечислите характеристики камерной ступени турбинной решетки – ротора (выберите несколько вариантов):

А) Вал турбины.

Б) Диск.

В) Рабочая лопатка.

Г) Обмотка.

8) Перечислите характеристики камерной ступени турбинной решетки – статора (выберите несколько вариантов):

А) Диафрагма.

Б) Корпус или обойма.

В) Сопловая решетка.

Г) Все вышеперечисленные.

9) Какое ускорение возникает у потока, движущегося по цилиндрическим поверхностям в зазоре крыльчатки?

А) Центробежное ускорение.

Б) Угловое ускорение.

В) Реактивная тяга.

10) Физические причины появления сегментных потерь на правом конце дуги?

А) затраты энергии на выталкивание (выколачивание) застойного пара.

Б) затраты энергии на эжекцию пара из зазора.

В) затраты энергии на подсосывание застойного пара из зазора за счет инерционного воздействия оставшегося в канале активного пара.

Г) потери располагаемой энергии из-за утечки активного пара в зазор между диафрагмой и РЛ вследствие прилипания струи пара крайнего соплового канала к стенке диафрагмы.

11) Физические причины появления сегментных потерь на левом конце дуги?

А) затраты энергии на выталкивание (выколачивание) застойного пара.

Б) затраты энергии на эжекцию пара из зазора.

В) *затраты энергии на подсосывание застойного пара из зазора за счет инерционного воздействия оставшегося в канале активного пара.*

Г) *потери располагаемой энергии из-за утечки активного пара в зазор между диафрагмой и РЛ вследствие прилипания струи пара крайнего соплового канала к стенке диафрагмы.*

12) В первом приближении капли рассматриваются как сферы, какие на них действуют силы (выберите несколько вариантов)?

А) от градиента давления в канале.

Б) сила тяжести.

В) архимедова сила.

Г) сила аэродинамического сопротивления.

Д) *Все вышеперечисленные.*

13) Какие преимущества многоступенчатых турбин (выберите несколько вариантов)?

А) В многоступенчатой турбине за счет уменьшения теплоперепада, приходящегося на одну ступень, легко получить оптимальное отношение скоростей, а следовательно, высокий КПД.

Б) С увеличением числа ступеней высоты сопловых и рабочих лопаток во всех ступенях увеличивается.

В) В многоступенчатых турбинах энергия выходной скорости предыдущей ступени используется в сопловых лопатках последующей.

Б) *Все вышеперечисленные.*

14) Назначение концевых уплотнений (выберите несколько вариантов)?

А) *Предназначены для предотвращения утечки пара в машинный зал (или подшипники турбины) и/или предотвращения попадания воздуха внутрь корпуса турбины.*

Б) *Охлаждения ротора турбины в местах его опирания на подшипники.*

В) Охлаждения статора турбины в местах его опирания на подшипники.

15) Дайте определение номинальная мощность –

А) наибольшая мощность, которая может развиваться на зажимах электрического генератора в течение практически любого отрезка времени не только при номинальных параметрах пара, но и при их отклонениях от номинальных, оговоренных в технических условиях на поставку турбины.

Б) кратковременное превышение мощности выше номинальной при отклонениях параметров пара от номинальных значений и отключении регенеративных подогревателей.

В) мощность, соответствующая наибольшей экономичности.

Задания с развернутым ответом:

1) Дайте общее описание конструкции паровой турбины:

Паровая турбина представляет собою роторный лопаточный двигатель, в котором энергия давления поступающего из котла пара сначала преобразуется в кинетическую энергию пара, вытекающего с большой скоростью из сопел, а затем, на лопатках ротора, - в механическую энергию вращения вала. Сопла — это направляющие аппараты, предназначенные для преобразования внутренней энергии пара в кинетическую энергию упорядоченного движения молекул.

2) Обоснуйте необходимость сепарации пара:

В энергоблоках ВВЭР (PWR) используют, как правило, паротурбинный цикл с насыщенным паром относительно низкого давления (не более 7 МПа). При таких параметрах загрязнение насыщенного пара происходит только за счет уноса паром капель влаги с растворенными в них солями и нерастворимыми продуктами (растворимость солей в паре в почти нулевая). При высоких давлениях (свыше 7 МПа) содержание в паре некоторых веществ (оксидов железа и кремниевой кислоты) существенно повышается и более заметная доля их начинает выноситься с паром с поверхностей нагрева.

3) За счет чего осуществляется конвекция теплоты:

Конвекция теплоты осуществляется за счет перемещения макрообъемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция протекает совместно с процессом теплопроводности. Сочетание конвекции и теплопроводности, наблюдаемое в текучих средах, называют конвективным теплообменом.

4) Дайте режимам движения потоков по интенсивности:

По интенсивности движения различают два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. Для большинства флюидов существует и переходный от ламинарного к турбулентному режим течения. Признаки ламинарного режима течения:

— частицы среды движутся по плавным взаимно непересекающимся траекториям; — параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются гладкими функциями координат и времени;

— перенос субстанции (теплоты, импульса и массы) осуществляется за счет взаимодействия микрочастиц среды (атомов, молекул, ионов и т. п.). Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и коэффициент диффузии) являются физическими характеристиками вещества. Коэффициенты переноса субстанции для разных веществ определяют экспериментально и приводят в справочных таблицах в зависимости от температуры. Признаки турбулентного режима течения: — частицы среды движутся по сложным, ломаным, взаимно пересекающимся траекториям;

— параметры течения (температура, скорость, давление и концентрация примесей) являются пульсирующими функциями координат и времени;

— перенос субстанции (теплоты, импульса и массы) осуществляется за счет взаимодействия макрообъемов среды (турбулентных молекул). Поэтому коэффициенты переноса субстанции (коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости и коэффициент диффузии) зависят от самого режима движения и не являются физическими характеристиками вещества.

5) Дайте определение процессу конденсации и какие виды конденсации бывают:

Конденсация – процесс перехода пара (газа) в жидкое или твердое состояние (десублимация). При конденсации пара выделяется теплота фазового перехода (скрытая теплота парообразования), поэтому процесс конденсации неразрывно связан с теплообменом. Условия протекания стационарного процесса конденсации:

- 1) температура стенки должна быть ниже температуры насыщения при данном давлении ($T_w < T_n$);
- 2) отвод теплоты от поверхности, на которой образуется конденсат. Различают три вида конденсации: пленочную, капельную и смешанную.

Критерии и шкалы оценивания:

Для оценивания выполнения заданий используется балльная шкала:

1) открытые задания (тестовые, средний уровень сложности):

- 1 балл – указан верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ, в том числе частично.

2) задания с развернутым ответом:

- 5 баллов – указан верный ответ;
- 2 балла – указан частично верный ответ;
- 0 баллов – указан неверный ответ.