

А.Д.Трухний
А.Е.Булкин

Тихоходные паровые турбины атомных электрических станций

Допущено УМО вузов России по образованию в области тепло- и электроэнергетики
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлениям
“Энергомашиностроение” и “Теплоэнергетика”

Второе издание, стереотипное

Учебное пособие для вузов



Москва

Издательский дом МЭИ

2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5	2.3.2. Быстроходные и тихоходные турбины для АЭС	67
Основные условные обозначения и сокращения	7	2.3.3. Тихоходные паровые турбины АЭС России	69
Глава первая. Процессы преобразования энергии на АЭС	10	2.3.4. Тихоходные паровые турбины зарубежных производителей	77
1.1. Атомная энергетика и ее перспективы	10	Контрольные вопросы	90
1.2. Технологический процесс производства электроэнергии на АЭС	16	Литература для самостоятельного изучения	90
1.2.1. Ядерное горючее АЭС	16	Глава третья. Конструкции деталей и узлов турбины К-1000-5,9/25-2	91
1.2.2. Ядерные реакторы АЭС	17	3.1. Краткое описание тепловой схемы турбоустановки и паровой турбины	91
1.2.3. Технологические схемы производства электроэнергии на АЭС с реакторами типов ВВЭР и РБМК	23	3.2. Материалы, используемые для деталей турбины и оборудования турбоустановки	98
1.3. Основные законы перехода тепловой энергии в работу	25	3.2.1. Основные свойства материалов	98
1.4. Термодинамические свойства воды и водяного пара	28	3.2.2. Материалы деталей турбин и вспомогательного оборудования	100
1.4.1. Вода и насыщенный пар	28	3.3. Рабочее облопачивание проточной части	102
1.4.2. Влажный пар	29	3.3.1. Условия работы облопачивания	102
1.4.3. Перегретый пар	29	3.3.2. Конструкции облопачивания	102
1.4.4. Диаграммы водяного пара	30	3.3.3. Материалы рабочих лопаток	112
1.5. Тепловые циклы турбинных установок	32	3.4. Валопровод турбины	112
1.5.1. Цикл Ренкина и КПД конденсационной турбоустановки	32	3.4.1. Условия работы валопровода	112
1.5.2. Регенеративный цикл	37	3.4.2. Конструкции роторов валопровода	112
Контрольные вопросы	39	3.4.3. Конструкции соединительных муфт	115
Литература для самостоятельного изучения	39	3.4.4. Материалы роторов	116
Глава вторая. Тепловой процесс в паровой турбине, ее устройство и конструкции тихоходных паровых турбин	40	3.5. Статор паровой турбины	116
2.1. Тепловой процесс в турбинной ступени	40	3.5.1. Условия работы статора	116
2.1.1. Истечение пара из сопл.	40	3.5.2. Конструкции корпуса ЦВД	117
2.1.2. Турбинные решетки	41	3.5.3. Обоймы диафрагм ЦВД	122
2.1.3. Преобразование энергии в турбинной ступени	44	3.5.4. Диафрагмы ЦВД	125
2.1.4. Реактивность ступени	46	3.5.5. Сопловые аппараты первых ступеней ЦВД	128
2.1.5. Треугольники скоростей	47	3.5.6. Конструкция статора ЦВД	130
2.1.6. Относительный лопаточный КПД турбинной ступени	51	3.6. Уплотнения турбины	137
2.1.7. Относительный внутренний КПД ступени	52	3.7. Подшипники турбины	140
2.1.8. Ступени с закрученными лопатками	56	3.7.1. Опорные подшипники	141
2.2. Тепловой процесс в паровой турбине	58	3.7.2. Упорные подшипники	148
2.2.1. Необходимость и преимущества многоступенчатой конструкции турбины	58	3.8. Опоры валопровода турбоагрегата	154
2.2.2. Парораспределение паровой турбины	59	3.9. Опираие турбоагрегата на фундамент и организация его тепловых расширений	158
2.2.3. Превращение тепловой энергии в работу в многоступенчатой турбине	60	3.10. Валоповоротное устройство	168
2.2.4. Концевые уплотнения турбины	63	Контрольные вопросы	169
2.2.5. Уравновешивание осевых усилий в турбине	63	Литература для самостоятельного изучения	169
2.2.6. Многоцилиндровые турбины	65	Глава четвертая. Маслоснабжение турбоустановки	171
2.3. Конструкции тихоходных паровых турбин	65	4.1. Независимый привод насосов маслоснабжения турбоустановки	171
2.3.1. Пропускная способность однопоточной паровой турбины	65	4.2. Повышение пожарной безопасности турбины	172
		4.3. Централизованная система смазки турбоустановки	174
		4.4. Маслоснабжение системы автоматического регулирования и защиты турбины	179
		4.5. Система гидropодъема роторов	185

4.6. Система уплотнения вала турбоагрегата	186	7.1.2. Изгиб лопаток от парового усилия	274
Контрольные вопросы	194	7.1.3. Допускаемые напряжения	275
Литература для самостоятельного изучения.	195	7.2. Колебания и вибрационная надежность	
Глава пятая. Система регулирования турбины	196	рабочих лопаток	275
5.1. Общие принципы построения системы		7.2.1. Колебания отдельной лопатки.	275
регулирования турбины и ее характеристики	196	7.2.2. Влияние вращения на собственные	
5.1.1. Паровая турбина как объект		частоты лопаток.	277
регулирования.	196	7.2.3. Колебания пакета лопаток	277
5.1.2. Статическая характеристика		7.2.4. Возмущающие силы	
регулирования.	198	в ступени турбины	278
5.1.3. Нечувствительность регулирования.	199	7.2.5. Динамические напряжения в лопатках	
5.1.4. Механизм управления турбиной	200	при резонансе	280
5.1.5. Параллельная работа		7.2.6. Пакетный множитель	282
турбогенераторов	204	7.2.7. Обеспечение вибрационной надежности	
5.2. Работа энергоблоков в мощных		лопаток	283
энергосистемах	206	7.3. Эрозия рабочих лопаток и меры	
5.2.1. Статическая устойчивость	207	по ее снижению	284
5.2.2. Динамическая устойчивость.	208	7.4. Прочность роторов	286
5.2.3. Устойчивость объединенных		7.5. Колебания и вибрационная	
энергосистем.	210	надежность роторов	287
5.3. Регулирование энергоблоков АЭС		Контрольные вопросы	290
с реакторами типа ВВЭР	211	Литература для самостоятельного изучения	291
5.3.1. Ядерный энергетический реактор		Глава восьмая. Конденсационные установки	
как объект регулирования	211	паровых турбин	292
5.3.2. Принципиальная схема регулирования		8.1. Назначение и принцип действия конденсатора	
энергоблока с реактором типа ВВЭР	214	и конденсационной установки	292
5.4. Регулирование турбины К-1000-5,9/25-2	218	8.2. Тепловые процессы, происходящие	
5.4.1. Парораспределение турбины	218	в конденсаторе.	295
5.4.2. Электрогидравлическая система		8.3. Воздухоотсасывающие устройства	298
регулирования.	225	8.4. Системы поддержания чистоты конденсатора	303
5.4.3. Гидравлическая система		8.5. Тепловой баланс конденсатора	
регулирования.	233	и его тепловой расчет	304
5.4.4. Конструкции элементов систем		8.6. Конструкции конденсаторов.	306
регулирования.	236	8.6.1. Трубные пучки конденсаторов	309
5.5. Динамические процессы в энергоблоках		8.6.2. Материалы конденсаторных трубок	312
АЭС при сбросах нагрузки	249	8.6.3. Гидравлическая плотность	
Контрольные вопросы	252	конденсатора	314
Литература для самостоятельного изучения.	254	8.7. Конденсатор турбины К-1000-5,9/25-2	317
Глава шестая. Система защиты турбины	255	8.8. Основы экономической эксплуатации	
6.1. Общие требования к технологическим		конденсационных установок	318
защитам турбины	255	Контрольные вопросы	322
6.2. Система защиты турбины К-1000-5,9/25-2.	256	Литература для самостоятельного изучения	322
6.2.1. Защита по повышению частоты		Глава девятая. Турбопитательная установка	
вращения	259	энергоблока с турбиной К-1000-5,9/25-2	323
6.2.2. Защиты, вызывающие отключение		9.1. Условия работы турбопитательной установки	323
турбины со срывом вакуума	262	9.2. Турбопитательный насосный агрегат	324
6.2.3. Защиты, связанные с работой		9.3. Приводная паровая турбина К-12-10ПА	329
теплообменных аппаратов	264	9.4. Система маслоснабжения ТПН	332
6.3. Беззолотниковое защитное устройство.	264	9.5. Система регулирования приводной турбины	335
6.4. Исполнительные органы системы защиты	266	9.6. Конструкции элементов системы	
Контрольные вопросы	270	регулирования приводной турбины.	338
Литература для самостоятельного изучения.	271	9.7. Система защиты ТПН	345
Глава седьмая. Прочность и вибрация рабочих		9.8. Конструкции элементов системы защиты	347
лопаток и роторов	272	Контрольные вопросы	352
7.1. Статическая прочность рабочих лопаток	272	Литература для самостоятельного изучения	353
7.1.1. Растяжение рабочих лопаток		Словарь основных терминов	354
центробежными силами.	272		